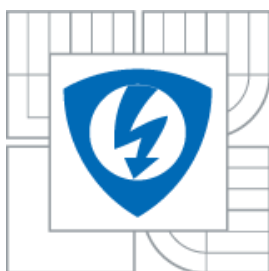




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ULTRAZVUKOVÝ MĚŘÍCÍ SYSTÉM

ULTRASONIC MEASUREMENT SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

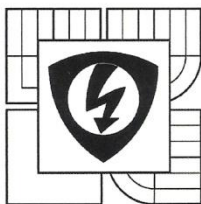
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ ONDRACZKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Lukáš Ondraczka
Ročník: 2

ID: 115291
Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Ultrazvukový měřicí systém

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte inteligentní měřicí modul pro experimentální měření proudění vzduchu kolem fotovoltaiického panelu pomocí ultrazvuku. Ověřte funkci navrhovaného měřicího systému v laboratorních podmínkách v aerodynamickém tunelu. Měřicí systém umístěte na fotovoltaiický panel a opět ověřte jeho funkčnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Jiří Hofman


prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a realizací prototypu měřicího modulu pro měření proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu pomocí ultrazvuku. Tento systém umožní kvantifikovat pasivní chlazení panelu proudícím vzduchem. Obsahuje vývoj sinusového generátoru, můstkového zesilovače a přijímače s pasivní pásmovou propustí, zesilovačem a komparátorem. Dále se zabývá realizací digitální části tohoto systému, která je tvořena mikrokontrolérem Renesas 78K0R na vývojové desce. Také obsahuje testování kompletního systému v aerodynamickém tunelu a na venkovní instalaci panelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

ultrazvuk, anemometr, fotovoltaika, proudění vzduchu, pasivní chlazení

ABSTRACT

The work deals with development and assembly of ultrasonic airflow measurement module for measurement of air flowing around photovoltaic panel. This system allows quantification of photovoltaic panel air cooling. The work contains development of sine wave generator, bridge amplifier and receiver with passive band pass filter, amplifier and comparator. It also deals with digital part realization. This digital part is formed by Renesas 78K0R microcontroller on demo board. The last part of this work contains testing of the whole system in aerodynamic tunnel and on photovoltaic panel installation.

KEYWORDS

ultrasound, anemometer, photovoltaics, airflow, passive cooling

ONDRACZKA, L. *Ultrazvukový měřicí systém*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2013. 59 s., 8 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ultrazvukový měřicí systém jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za poskytnutí zařízení a prostor nezbytných pro realizaci práce a také za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Hofmanovi za poskytnutou pomoc, odborné rady a poskytnutí zařízení, mimo jiné i aerodynamického tunelu, který byl také nezbytný pro úspěch práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků.....	vii
Seznam tabulek.....	viii
Úvod.....	1
1 Fotovoltaické systémy	2
1.1 Fotovoltaické články a jejich účinnost	2
1.2 Fotovoltaické panely.....	3
1.3 Fotovoltaické elektrárny	4
2 Možnosti měření proudění vzduchu	5
2.1 Mechanické anemometry.....	5
2.2 Termální anemometry.....	6
2.3 Akustické anemometry	6
2.4 Další druhy anemometrů	7
3 Ultrazvuk	8
3.1 Rozdíly mezi ultrazvukovými a zvukovými vlnami.....	8
3.2 Útlum ultrazvuku.....	8
3.3 Využití ultrazvuku	9
3.4 Rychlost šíření ultrazvuku	10
3.5 Využití ultrazvuku v této práci	11
4 Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu.....	12
4.1 Součásti měřicího systému	12
4.1.1 Měření intenzity slunečního záření	12
4.1.2 Měření výstupního výkonu	13
4.1.3 Měření teplot panelu a okolního vzduchu.....	13
4.1.4 Měření směru a rychlosti větru	14
4.1.5 Měření proudění vzduchu v okolí panelu	14
4.1.6 Sběr dat	15
4.2 Software UMS	15
5 Princip ultrazvukového měřicího systému	16
5.1 Výpočet rychlosti proudění vzduchu.....	16
5.2 Zisk vektoru proudění.....	17
6 Návrh měřicího systému.....	18
6.1 Blokové schéma.....	18

6.2	Popis systému	19
7	Návrh elektroniky analogové části měřicího systému.....	20
7.1	Budič.....	20
7.2	Zesilovač.....	23
7.3	Ultrazvukový měnič	25
7.4	Přijímač.....	26
8	Návrh digitální části měřicího systému	29
8.1	Požadavky na mikrokontrolér.....	29
8.2	Mikrokontrolér Renesas 78K0R/FG3.....	29
8.3	Vývojový diagram programu mikrokontroléru	30
9	Testy použitého hardware.....	32
9.1	Testy stability zesilovače	32
9.2	Frekvenční charakteristika ultrazvukových měničů	32
9.2.1	Způsob měření v laboratoři	33
9.2.3	Závěry z měření frekvenční charakteristiky při různých teplotách	36
9.3	Směrová charakteristika ultrazvukových měničů.....	36
9.4	Přenos signálu mezi měniči na různých vzdálenostech.....	37
10	Realizace systému.....	38
10.1	Nepájivé kontaktní pole.....	38
10.2	Univerzální plošný spoj	38
10.3	Deska plošných spojů	39
11	Měření proudění vzduchu	41
11.1	Měření v aerodynamickém tunelu	41
11.2	Zhodnocení měření v aerodynamickém tunelu	44
11.3	Měření na venkovní instalaci panelu	44
11.4	Zhodnocení měření na venkovní instalaci panelu	45
12	Závěr	46
	Literatura.....	47
	Seznam použitých zkratk	50
	Seznam příloh	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Pokles účinnosti panelů s rostoucí teplotou [2]	3
Obr. 1.2:	Agua Caliente solar project [10]	4
Obr. 1.3:	Stav fotovoltaických elektráren v ČR [13]	4
Obr. 2.1:	Anemometr TX20ETH [14]	5
Obr. 2.2:	Ultrazvukový anemometr Vaisala WMT700 [15]	6
Obr. 2.3:	Pitotovy trubice použité pro testování aerodynamiky monopostu F1	7
Obr. 4.1:	Pyranometr CMP 21 [17]	12
Obr. 4.2:	Kryt snímačů teploty vzduchu [6]	13
Obr. 4.3:	Modul používaný Ing. Hofmanem pro měření rychlosti a směru větru [6] ..	14
Obr. 4.4:	Kompletní měřicí systém [6]	15
Obr. 5.1:	Zisk vektoru proudění	17
Obr. 6.1:	Blokové schéma systému	18
Obr. 7.1:	Schéma budícího bloku	20
Obr. 7.2:	Simulace budiče v PSpice	21
Obr. 7.3:	Výstupní signál generátoru čtvercových vln	22
Obr. 7.4:	Výstupní sinusový signál celého budiče	22
Obr. 7.5:	Schéma bloku zesilovače	23
Obr. 7.6:	Simulace zesilovače PSpice	24
Obr. 7.7:	Výstup zesilovače na osciloskopu	24
Obr. 7.8:	UZ měnič 400EP18A [9]	25
Obr. 7.9:	Přijímač	26
Obr. 7.10:	Simulace přijímače s aktivním zesilovačem	27
Obr. 7.11:	Simulace přijímače při zpracovávání signálu z UZ měniče	27
Obr. 7.12:	Výstupní signál měniče s výstupem zesilovače z osciloskopu [25]	28
Obr. 7.13:	Výstupní signál zesilovače a komparátoru osciloskopu [25]	28
Obr. 8.1:	MCU RL78K0R [27] při měření	30
Obr. 8.2:	Nastavení přerušení pomocí programu Applilet	30
Obr. 8.3:	Vývojový diagram programu MCU	31
Obr. 9.1:	Generátor TESLA BM 492 []	32
Obr. 9.2:	UZ měniče při měření	33
Obr. 9.3:	Frekvenční charakteristika prvního páru měničů	34
Obr. 9.4:	Frekvenční charakteristika druhého páru měničů	34
Obr. 9.5:	Měření ideální frekvence při 11 °C	35
Obr. 9.6:	Frekvenční charakteristika při teplotě 11 °C	35
Obr. 9.7:	Směrová charakteristika (svislá osa – dB, kruhová osa – stupně)	36
Obr. 9.8:	Závislost $U_{p,p}$ výstupního napětí UZ měniče na vzdálenosti měničů	37
Obr. 10.1:	Centrální modul	38
Obr. 10.2:	Univerzální plošný spoj použitý pro testy	39
Obr. 10.3:	Vyrobené DPS	40
Obr. 10.4:	DPS umístěna v plastové konstrukční krabici	40
Obr. 11.1:	Systém použit pro měření	41
Obr. 11.2:	Umístění UZ měničů v tunelu	42
Obr. 11.3:	Měření pomocí anemometru TX20ETH [14]	42
Obr. 11.4:	Závislost naměřené hodnoty proudění na PWM motoru	43
Obr. 11.5:	Měření na venkovní instalaci panelu	45

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1:	Oblasti využití ultrazvuku	9
Tab. 3.2:	Rychlosti šíření ultrazvuku v různých látkách	10
Tab. 3.3:	Rychlosti šíření ultrazvuku při různých teplotách	10
Tab. 11.1:	Výsledky měření v aerodynamickém tunelu.....	43
Tab. 11.2:	Měření na venkovní instalaci panelu	45

ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem a sestavením prototypu ultrazvukového měřicího systému, který bude sloužit k analýze proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu za účelem pasivního chlazení panelu.

Fotovoltaika jako taková se řadí mezi aktuálně velmi využívané a do budoucna nadějně obnovitelné zdroje energie. Využívá přímé přeměny solární energie na elektrickou energii pomocí fotovoltaických článků. Její velkou výhodou je minimální dopad na životní prostředí a možnost využití i pro soukromou výrobu elektřiny pro domácnosti. Nevýhodou je vyšší cena, která ovšem díky intenzivnímu vývoji a obecnému zájmu o obnovitelné zdroje postupně klesá. Současná technologie je podle [1] na takové úrovni, že fotovoltaické systémy vytvoří energii v hodnotě odpovídající jejich výrobní ceně během přibližně 5 let. Dalším problémem je stárnutí fotovoltaických panelů, kdy dochází k poklesu účinnosti s rostoucí provozní dobou panelu. V ČR byl v roce 2011 podíl fotovoltaiky na celkové výrobě elektřiny 2,4 %. Globálně je ovšem podíl fotovoltaiky na energetickém trhu pořád velmi nízký (cca 0,01 % [1]).

První část práce shrnuje teoretické poznatky k pochopení problematiky této práce. V první kapitole se práce věnuje popisu fotovoltaických systémů, v druhé kapitole jsou řešeny různé metody měření proudění vzduchu, třetí kapitola popisuje ultrazvuk a jeho vlastnosti, čtvrtá kapitola se zabývá popisem měřicího systému Ing. Jiřího Hofmana, jehož součástí je i tento systém a v páté kapitole je popsán princip měření rychlosti vzduchu pomocí ultrazvuku.

Druhá část práce popisuje návrh samotného zařízení. Šestá kapitola obsahuje popis jednotlivých částí systému a blokové schéma celého systému. Sedmá kapitola se věnuje návrhu bloků analogové části systému a v osmé kapitole je popsán návrh digitální části systému.

V poslední části práce jsou zahrnuty testy navržených částí systému v kapitole 9 a konečná realizace systému v kapitole 10. Kapitola 11 již uvádí výsledky testů v laboratoři a na venkovní instalaci panelu.

1 FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY

Fotovoltaické systémy sestávají z fotovoltaických článků pospojovaných do fotovoltaických panelů, které dále tvoří fotovoltaické elektrárny. Tato kapitola popisuje tyto struktury.

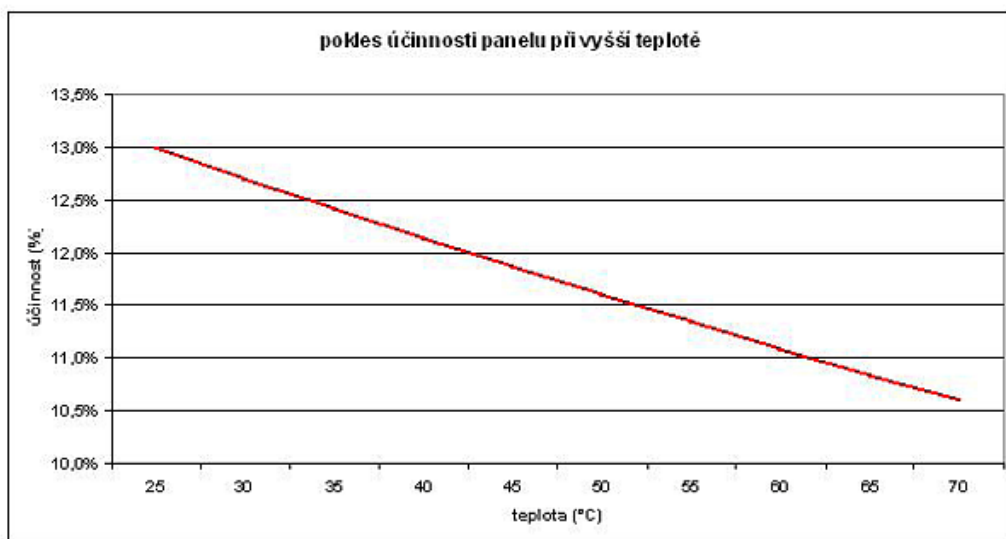
1.1 Fotovoltaické články a jejich účinnost

Fotovoltaický článek je velkoplošná dioda s alespoň jedním PN přechodem. Ozářením se v něm generují páry elektron-díra a ty jsou pak separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu. Takto rozdělený náboj vytváří napětí mezi + a – kontaktem článku.

Existují různé druhy fotovoltaických článků. Zdaleka nejrozšířenější jsou v současnosti články založené na krystalickém křemíku, které podle [1] tvoří až 85 % všech fotovoltaických panelů. Z jiných technologií jsou nejvýznamnější tenkovrstvé články, tandemové články a organické články.

Účinnost běžně využívaných křemíkových článků se podle [1] pohybuje mezi 14 % až 17 % (u laboratorních vzorků až 28 %). Jejich životnost je oproti ostatním technologiím také vysoká (minimálně 30 let, v praxi výrobci ručí za 90 % produkci po 10 letech a 80 % produkci po 25 letech [3]). Pro porovnání tenkovrstvé články (tzv. články druhé generace) dosahují účinnosti pouze 7 % – 9 % a jejich životnost je také menší, nicméně jsou levnější a lehčí než články z krystalického křemíku (vysoká cena je obecně největší nevýhodou těchto článků). Zmíněná energetická návratnost je u systémů s tenkovrstvými články zhruba poloviční než u systémů založených na krystalickém křemíku.

Účinnost článků je velmi ovlivněna především teplotou. Tento problém je pro tuto práci stěžejní. Paradoxně s vyšší teplotou účinnost článků klesá (viz. obr. 1.1). Proto je vhodné zajistit účinné a zároveň energeticky výhodné chlazení fotovoltaického panelu. Aktivní chlazení vodou bohužel není energeticky výhodné, protože samotné chlazení je v tomto případě dražší, než zisk plynoucí ze zvýšení účinnosti panelu. Lze je využít pro sledování maximální možné účinnosti panelu na různých prototypch, ale pro komerční využití nejsou vhodné. V praxi se využívá pasivní chlazení panelů vzduchem pomocí umístění panelů na speciální konstrukce či na místa, kde charakter okolí zajistí dobré proudění vzduchu. Měřicí systém vyvíjený v této práci umožní měřit toto proudění a kvantifikovat vhodnost dané konstrukce či umístění.



Obr. 1.1: Pokles účinnosti panelů s rostoucí teplotou [2]

Pracovní napětí fotovoltaického článku se pohybuje na hodnotě pouze 0,5 V, což je pro běžné využití velmi nízké. Proto se články propojují do sérií a vytváří se sestavy se jmenovitým napětím obvykle 12 V nebo 24 V. Tyto sestavy jsou hermeticky uzavřeny do krycích materiálů a tvoří výsledný fotovoltaický panel.

1.2 Fotovoltaické panely

Jak již bylo zmíněno, fotovoltaické panely jsou sestavy sériově propojených fotovoltaických článků, uzavřené do určité konstrukce.

Obvykle se jedná o 36 nebo 72 článků (podle velikosti výstupního napětí, tedy 12 V / 24 V). Konstrukce musí chránit články před klimatickými vlivy a zároveň musí mít co nejlepší transparentnost. Používají se speciálně tvrzené skla. Dále také musí být konstrukce odolná proti povětrnostním vlivům.

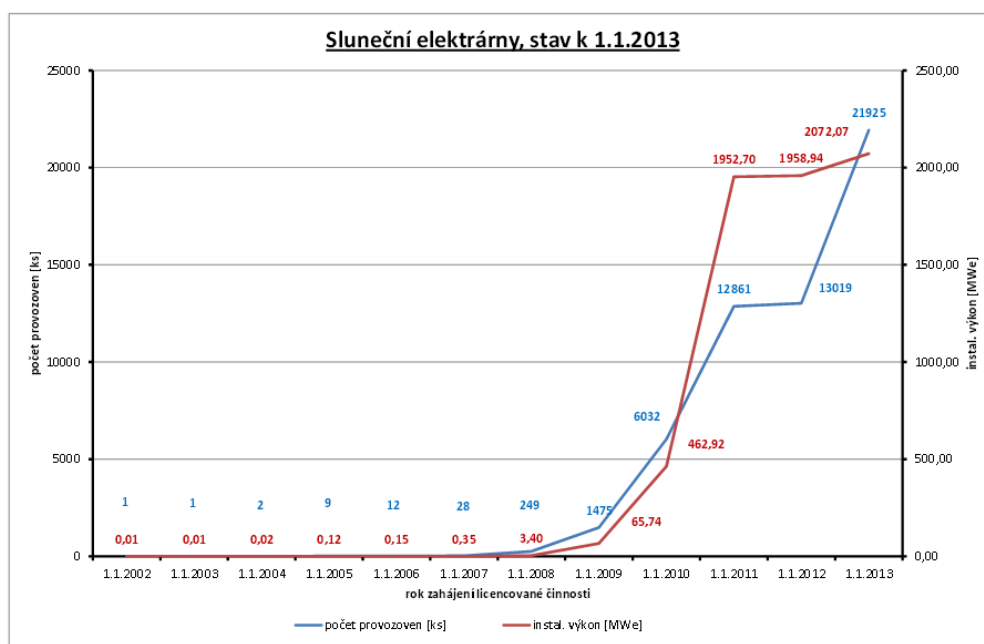
Rozměry těchto panelů se navzájem velmi liší. Standardně se pohybují průměrně mezi 1600 mm x 800 mm x 45 mm a 500 mm x 350 mm x 25 mm. Existují ovšem i panely s rozměry až 2000 mm x 1000 mm x 45 mm. Rozměry panelů jsou pro tuto práci velmi důležité, protože měřicí systém bude univerzální a je žádoucí aby byl schopen měřit na co nejvíce možných panelech.

1.3 Fotovoltaické elektrárny

Nejvýznamnější praktickou aplikací fotovoltaiky jsou fotovoltaické elektrárny. Jedná se o velké komplexy fotovoltaických panelů. V současnosti je největší elektrárnou Agua Caliente elektrárna v Arizoně v USA (viz. obr. 1.2). Tato elektrárna dosahuje výkonu až 250 MW [10] (pro porovnání obě jaderné elektrárny v ČR, Temelín a Dukovany, dosahují každá výkonu 2000 MW [11] a vodní elektrárna Tři Soutěsky v Číně má výkon až 22 500 MW [12]). V Čechách je v současnosti solární energie v procesu prudkého růstu (viz. obr. 1.3) a celkový výkon dosahoval k 1.1.2013 až 2000 MW [13].



Obr. 1.2: Agua Caliente solar project [10]



Obr. 1.3: Stav fotovoltaických elektráren v ČR [13]

2 MOŽNOSTI MĚŘENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU

Měření proudění vzduchu se provádí pomocí anemometrů. Anemometry mohou měřit buď pouze rychlost proudění, nebo i směr proudění. Využívají se především v meteorologii a aerodynamice. Anemometry se také podle principu mohou dělit na mechanické anemometry, termální anemometry a akustické anemometry.

2.1 Mechanické anemometry

Pro měření proudění větru využívají mechanické anemometry přenášení energie větru na určitou mechanickou konstrukci, která se jejím vlivem vychyluje nebo rotuje. Mezi nejrozšířenější patří miskové anemometry, lopatkové anemometry a anemometry s výkyvnou deskou.

Miskové anemometry jsou v současnosti standardem pro meteorologické aplikace. Jedná se o levné zařízení dosahující vysoké přesnosti. Nevýhodou těchto anemometrů je, že měří pouze rychlost větru (směr už ne). Dále trpí nevýhodami plynoucími z jejich mechanické konstrukce, tedy opotřebení a setrvačnost mechanických částí. "

Na obr. 2.1 je miskový anemometr TX20ETH [14], který umožňuje i měření směru větru. Tento anemometr je použit dále v měřicí části práce jako srovnávací měřič.



Obr. 2.1: Anemometr TX20ETH [14]

2.2 Termální anemometry

Termální anemometry využívají velmi tenký drátek (průměr několik μm) elektricky ohříváný na určitou teplotu. S rostoucí rychlostí větru je drátek ochlazován, což mění jeho odpor. Měřením odporu drátku lze ze závislosti rychlosti proudění na odporu drátku určit rychlost proudění.

Jsou vhodné pro měření nárazového a obecně nepravidelného proudění a jsou velmi přesné. Bohužel jsou technicky náročné, drátek je náchylný na klimatické vlivy a podobně jako zmíněné miskové anemometry neměří směr proudění.

2.3 Akustické anemometry

Akustické anemometry využívají k měření proudění vzduchu ultrazvuk. Vyhodnocují dobu přenosu ultrazvukových pulzů mezi páry ultrazvukových měničů. Ultrazvuk je ovlivňován prouděním vzduchu (je to totiž mechanické vlnění, viz. kapitola 3). Vzdálenost měničů je obvykle mezi 10 cm a 20 cm. Díky absenci mechanických částí jsou využívány v problematických oblastech (například v prašných oblastech nebo na moři, kde by tradiční miskové anemometry byly ovlivněny prachem a slaným mořským vzduchem) a také u nich odpadá problém s parazitní setrvačností. Výhodou je také měření směru proudění. Nevýhodou je vysoká cena, nutnost kalibrace a závislost rychlosti zvuku na různých okolních vlivech.

Na obr. 2.2 je komerční ultrazvukový anemometr Vaisala WMT700 [15].



Obr. 2.2: Ultrazvukový anemometr Vaisala WMT700 [15]

2.4 Další druhy anemometrů

V praxi je využíváno i několik speciálních typů anemometrů, používaných většinou pro specifické aplikace.

Z těchto jsou nejznámější anemometry založené na sledování změn tlaku vyvolaných prouděním vzduchu (tzv. aerodynamické anemometry). V praxi se jedná o tzv. Pitotovy trubice používané jako rychloměry u letadel, ale také v jiných průmyslových aplikacích. Jejich nevýhodou je nízká citlivost pro malé hodnoty proudění. Na obr. 2.3 jsou šipkami vyznačeny pitotovy trubice využívané pro testování aerodynamiky monopostů F1 [16].

Další zajímavé anemometry jsou založeny na optickém principu, kdy sledujeme pohyb částic předem rozptýlených ve zkoumaném plynu. Tyto anemometry umožňují určit kromě rychlosti i směr větru.

Poslední významnější skupinou anemometrů jsou anemometry založené na Dopplerově principu. Ty využívají k měření laser, u kterého se zjišťuje dopplerovský posun. Ty se pro měření proudění vzduchu využívají zejména k měření v aerodynamických testovacích tunelech. Spíše se používají k měření v jiných médiích (ve vodě, nebo měření vstřikování paliva, či měření průtoku krve v medicíně).



Obr. 2.3: Pitotovy trubice použité pro testování aerodynamiky monopostu F1

3 ULTRAZVUK

Ultrazvuk je akustické vlnění (tedy na mechanické podstatě) s frekvencí vyšší než 20 kHz, pro člověka neslyšitelné. Ultrazvuk prochází hmotným prostředím pomocí vibrací částic - aktivované částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Částice jsou však vázány elastickými silami, takže vibrace jedné se přenáší na sousední a tak se šíří ultrazvuková vlna prostředím. Ultrazvuk můžeme popsat těmito veličinami: akustický tlak, rychlost kmitání částic kolem rovnovážné polohy, rychlost šíření ultrazvukové vlny a hustota prostředí. Pro podrobnější informace o ultrazvuku viz. [4], nebo [5].

3.1 Rozdíly mezi ultrazvukovými a zvukovými vlnami

Hlavní rozdíl je ten, že ultrazvukové vlny jsou neslyšitelné pro člověka. Od slyšitelného zvuku se ultrazvuk liší frekvencí. Slyšitelný zvuk dosahuje frekvencí přibližně 20 Hz až 20 kHz (tyto hodnoty se u každého mírně liší), ultrazvuk je na frekvencích vyšších než 20 kHz. Dále se ještě definuje infrazvuk pro zvuky s frekvencí pod 20 Hz.

S vyšší frekvencí f klesá, při konstantní rychlosti šíření c , vlnová délka λ (viz. rovnice 1):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Z faktu, že ultrazvukové vlny mají nižší vlnovou délku, než zvukové vyplývá, že se oproti nim méně ohýbají, jsou méně absorbovány a lépe se odrážejí.

UZ a zvukové vlny mají společnou mechanickou povahu vlnění, tepelné účinky a stejnou rychlost šíření.

3.2 Útlum ultrazvuku

Intenzita UZ vlnění v prostoru je ovlivněna rozptylem vlnění, interferencí a vlastní absorpcí. K rozptylu dochází na částicích, které mají velikost srovnatelnou s vlnovou délkou. Tyto částice se potom chovají jako nesměrové zdroje ultrazvukového vlnění. Interference je jev, při kterém dochází k nekoherentnímu sečítání dvou či několika UZ vln. Při absorpci se mechanická energie přeměňuje na teplo. Od místa generování dochází tedy s rostoucí vzdáleností k poklesu intenzity. Tento pokles probíhá exponenciálně (amplituda klesá s druhou mocninou vzdálenosti).

V případě této práce je UZ signál využíván v prostředí vzduchu. Ultrazvuk se v plynech absorbuje řádově 1000krát více než v kapalinách. Na vzdálenosti UZ měničů 0,5 – 2 m je očekáván výrazný útlum.

3.3 Využití ultrazvuku

Ultrazvuk se využívá v mnoha praktických aplikacích. Například v ultrazvukové sonografii (lékařská diagnostická metoda), v ultrazvukových anemometrech, v ultrazvukové defektoskopii (ke kontrole kvality výrobků v průmyslu), nebo v podvodní navigaci jako sonar. Dále se ultrazvuk využívá k čištění materiálů, k obrábění materiálů, nebo i k měření (například tloušťky materiálu). V mikroelektronice je známé využití kontaktování čipů pomocí wire bondingu ultrazvukovým svařováním nebo termosonickou metodou. Dále se potom ultrazvuk využívá v mnoha jiných aplikacích. V této práci bude využit k analýze proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu. V tab. 3.1 jsou uvedeny příklady aplikací ultrazvuku.

Tab. 3.1: Oblasti využití ultrazvuku

Oblast	Frekvence	Oblast	Frekvence
Sonografie	1 - 18 MHz	Sonar	40 kHz – 60 kHz
Čištění	20 - 200 kHz	Měření vzdálenosti	40 kHz
Ultrazvukové zvlhčování vzduchu	jednotky MHz	Wire Bonding	30 kHz – 120 kHz
Defektoskopie	100 kHz – 15 MHz	Ultrazvukové anemometry	40 kHz
Měření tloušťky	Podle materiálu	Ultrazvuková liposukce	40 kHz – 60 kHz

3.4 Rychlost šíření ultrazvuku

Ultrazvukové vlny se šíří stejnou rychlostí jako slyšitelný zvuk. Tato rychlost je závislá na mnoha různých faktorech. Hlavním faktorem je druh látky, ve kterém se ultrazvuk šíří. Obecně platí, že v pevných látkách a v kapalinách se ultrazvuk šíří mnohem rychleji. Pro porovnání rychlostí šíření v různých látkách viz. tab. 3.2.

Tab. 3.2: Rychlosti šíření ultrazvuku v různých látkách

Látka	Rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Látka	Rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Vzduch	340	Led	3250
Voda	1500	Měď	3500
Ocel	5000	Sklo	5200

Pro tuto práci je předmětem zájmu rychlost šíření zvuku ve vzduchu. Ta je závislá především na teplotě vzduchu. Velmi zjednodušeně lze tuto rychlost vypočítat podle rovnice 2

$$c = (331,57 + 0,607 \cdot t) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (3.2)$$

kde c je rychlost zvuku, a t teplota

Pro odhad rychlostí ultrazvuku při různých teplotách viz. tab. 3.3.

Tab. 3.3: Rychlosti šíření ultrazvuku při různých teplotách

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Rychlost ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
-30	313,4	10	337,6
-20	319,4	20	343,7
-10	325,5	30	349,8
0	331,6	40	355,9

Pro laboratorní podmínky se dá uvažovat o přibližné rychlosti zvuku $345 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3.5 Využití ultrazvuku v této práci

Práce využívá změny rychlosti akustických vln způsobené prouděním vzduchu. Ultrazvuk je mechanické vlnění, proto je ovlivněn proudícím vzduchem. Vzduch zvýší (nebo naopak sníží) rychlost šíření ultrazvuku o svou rychlost. Při snaze měřit s přesností $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se tedy jedná o detekci $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ změny na základní rychlosti $345 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Například pro vzdálenost měření $0,5 \text{ m}$ bude takto muset systém zvládnout změřit přibližně $1,45 \text{ ms}$ dobu přenosu ultrazvuku a zároveň detekovat rozdíl způsoben tímto prouděním, což je cca $0,4 \text{ }\mu\text{s}$. Na delší vzdálenosti musí systém měřit delší časové intervaly přenosu, ale také budou klesat nároky na rozlišení (zminěné $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ proudění již způsobí třeba na jednom metru rozdíl $0,8 \text{ }\mu\text{s}$). Práce počítá s poklesem intenzity UZ vln s rostoucí vzdáleností měničů, protože vzhledem k rozloze panelů, na které bude systém umístěn, bude nutné přenášet ultrazvuk na vzdálenosti až 2 metry .

4 MĚŘÍCÍ SYSTÉM PRO SLEDOVÁNÍ EFEKTIVITY FOTOVOLTAICKÉHO PANELU

Ultrazvukový měřicí systém vyvíjený v této práci je součástí komplexu měřících zařízení, která mají za úkol dlouhodobě měřit efektivitu fotovoltaického panelu. Také má za úkol měřit různé klimatické podmínky a vyhodnocovat jejich vliv na efektivitu panelu. Tento měřicí systém byl vyvíjen Ing. Jiřím Hofmanem [6].

4.1 Součásti měřicího systému

Pro určení efektivity fotovoltaického panelu měří systém intenzitu dopadajícího záření a výstupní elektrický výkon. Dále měří klimatické vlivy, které mohou mít na tento systém vliv. Konkrétně se jedná o měření teploty panelu, teploty okolí, měření rychlosti větru v okolí panelu a měření proudění vzduchu přímo kolem panelu.

4.1.1 Měření intenzity slunečního záření

Pro měření intenzity slunečního záření zvolil Ing. Hofman pyranometr CMP 21 (viz. obr. 4.1) od firmy Kipp&Zonnen [17]. Tento konkrétní přístroj zvolil pomocí nástroje QFD matice.



Obr. 4.1: Pyranometr CMP 21 [17]

4.1.2 Měření výstupního výkonu

Tento modul byl hlavním tématem [6]. Ing. Hofman zde navrhl měření výstupního výkonu pomocí regulátoru výstupního napětí a proudu na bod maximálního výkonu a aktivní zátěží, která byla řešena jak v [6] Ing. Hofmanem, tak v [7] Ing. Vránou.

4.1.3 Měření teplot panelu a okolního vzduchu

Pro měření teploty panelu zvolil Ing. Hofman digitální snímače teploty DS18B20 od firmy Maxim Integrated [18]. Jedná se o číslicové teploměry v TO92 pouzdře s rozlišením $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ a chybou $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tyto snímače jsou umístěny na spodní straně panelu, čímž jsou chráněny před slunečním zářením.

Stejně snímače byly zvoleny pro měření teploty okolního vzduchu. Zde bylo třeba ještě doplnit snímače soustavou miskových žaluzií (obr. 4.2) k ochraně před slunečním zářením.



Obr. 4.2: Kryt snímačů teploty vzduchu [6]

4.1.4 Měření směru a rychlosti větru

Pro měření rychlosti a směru větru použil Ing. Hofman zařízení využívající miskový anemometr (zmíněný v kapitole 2). Tento modul umožňuje měřit i směr větru.



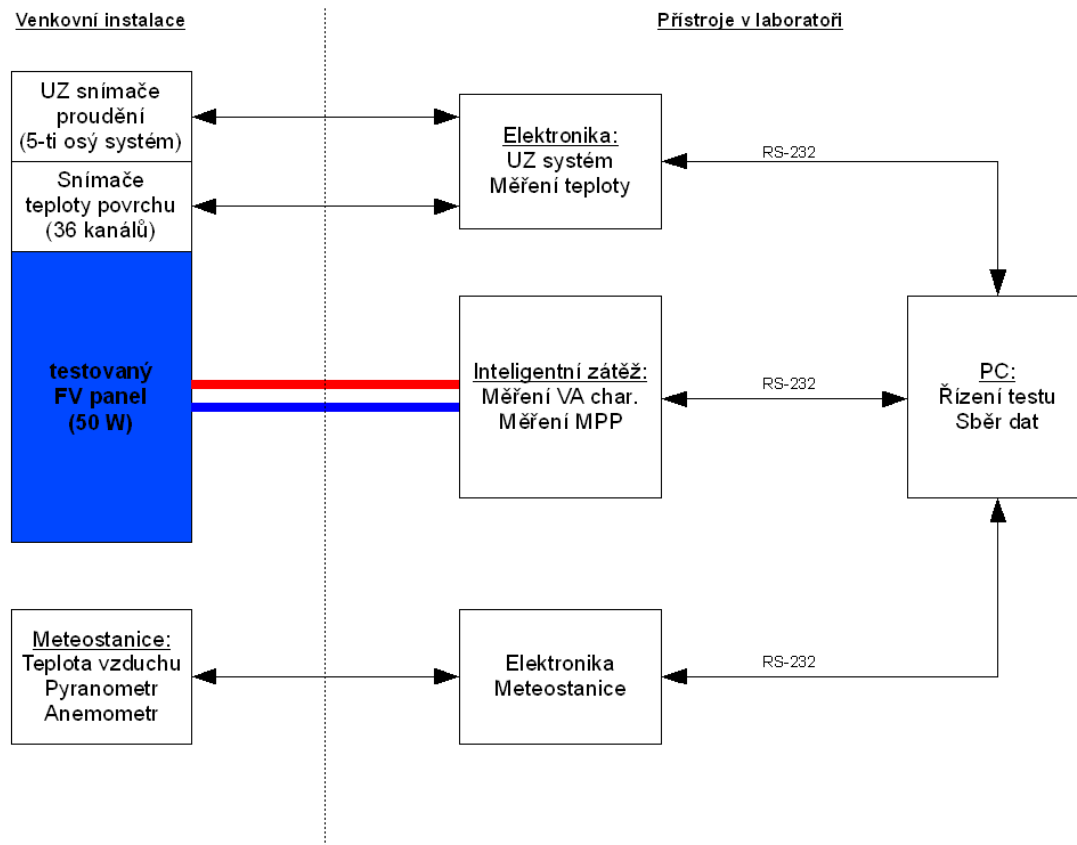
Obr. 4.3: Modul používaný Ing. Hofmanem pro měření rychlosti a směru větru [6]

4.1.5 Měření proudění vzduchu v okolí panelu

Další částí systému je měřicí systém pro měření proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu. V další práci Ing. Hofmana [8] byla zvolena jako nejlepší metoda měření pomocí ultrazvuku (pro další možnosti měření proudění vzduchu viz. kapitola 2). V [8] byly dále zvoleny požadavky na tento systém a byly také zvoleny ultrazvukové měniče použité i v této práci. Jedná se o model 400EP18A od firmy ProWAVE [9].

4.1.6 Sběr dat

Pro sběr dat systému byl Ing. Hofmanem zvolen PC a pro propojení modulů využívá rozhraní RS-232. Výsledné schéma měřicího systému je znázorněno na obr. 4.4 z [6].



Obr. 4.4: Kompletní měřicí systém [6]

4.2 Software UMS

Software UMS (Univerzální měřicí systém) je software vyvinut Ing. Jiřím Hofmanem k řízení měření a sběru dat z modulů měřicího systému.

Naměřená data jsou přenášena do řídicího počítače (PC), kde se ukládají pro vyhodnocení klimatických vlivů na účinnost panelu.

5 PRINCIP ULTRAZVUKOVÉHO MĚŘÍCÍHO SYSTÉMU

Tématem této práce je vývoj modulu pro měření proudění vzduchu ze systému popsaném v kapitole 4. Tento modul je založen na měření zpoždění/předstihu ultrazvukového signálu způsobeného vzduchem proudícím mezi měniči. V této kapitole je popsán výpočet rychlosti proudění vzduchu mezi měniči z těchto naměřených hodnot zpoždění.

5.1 Výpočet rychlosti proudění vzduchu

Výpočet vychází ze známé rovnice pro pohyb tělesa:

$$v = \frac{s}{t} \quad (5.1)$$

kde v ... rychlost
 s ... dráha
 t ... čas

Pro rychlost ultrazvuku, která je ovlivněna rychlostí proudění vzduchu, platí:

$$v_s \pm v_a = \frac{s}{t} \quad (5.2)$$

kde v_s ... rychlost zvuku (sound)
 v_a ... rychlost vzduchu

Za s lze dosadit pro nás známou vzdálenost mezi ultrazvukovými měniči:

$$v_s \pm v_a = \frac{l}{t} \quad (5.3)$$

kde l ... vzdálenost mezi měniči

Měníče jsou přímo naproti sobě, proto když bude vzduch zvyšovat rychlost ultrazvuku vysílaného prvním měničem, tak bude v opačném směru snižovat rychlost zvuku vysílaného druhým měničem. Po zvážení tohoto faktu lze dosadit:

$$v_s + v_a = \frac{l}{t_1} \quad v_s - v_a = \frac{l}{t_2} \quad (5.4)$$

kde t_1 ... doba přenosu měniče vysílajícího ve směru proudění vzduchu

kde t_2 ... doba přenosu měniče vysílajícího proti směru proudění vzduchu

Pro rychlost proudění vzduchu tedy platí:

$$v_a = \frac{l}{t_1} - v_s \qquad v_a = v_s - \frac{l}{t_2} \qquad (5.5)$$

Po sečtení rovnic zůstane:

$$2 * v_a = \frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} \qquad (5.6)$$

Po úpravě získáme vztah pro rychlost proudění:

$$v_a = \frac{1}{2} * \left(\frac{l}{t_1} - \frac{l}{t_2} \right) \qquad (5.7)$$

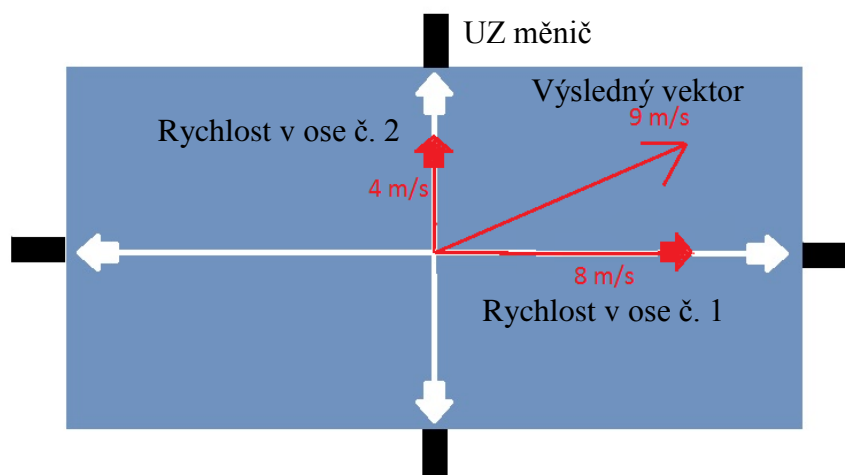
Z výsledné rovnice 7 vyplývá, že při známé vzdálenosti měničů l je potřeba znát pouze doby přenosu ultrazvuku mezi měniči pro výpočet rychlosti proudění mezi nimi.

Dalším poznatkem vyplývajícím z rovnice 5.7 je, že pro nulovou rychlost vzduchu by měly být obě naměřené doby přenosu (t_1 i t_2) stejné.

Podobným způsobem byl výsledný vztah 5.7 odvozen i v práci Ing. Hofmana [8].

5.2 Zisk vektoru proudění

Aby byl měřicí systém schopen určit vektor proudění vzduchu na panelu, musí sestávat z více os měření, kde bude v každé této ose vyhodnocena rychlost proudění a poté z těchto naměřených rychlostí sestaven vektor proudění. Příklad nejjednodušší takovéto sestavy je uveden na obr. 5.1, kde byl pomocí dvou jednoosých měření sestaven výsledný vektor. Pro získání přesnějšího měření lze přidat více měřících os podél panelu. Proto bude měřicí systém koncipován, tak aby jej bylo možné rozšířit na libovolný počet těchto párů.



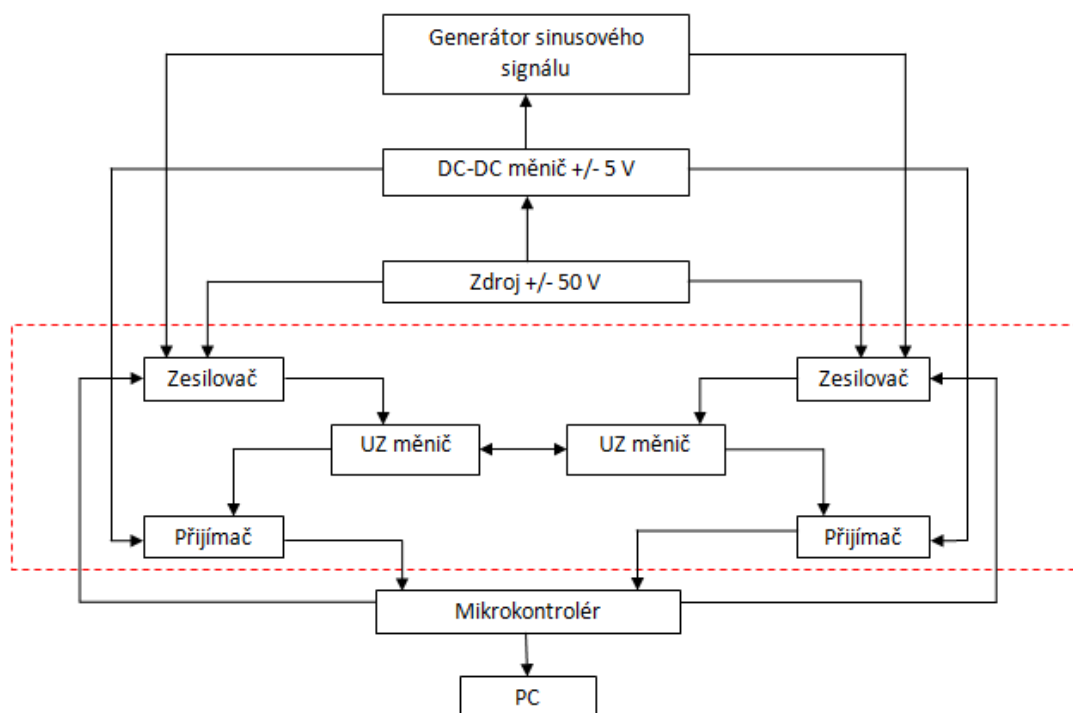
Obr. 5.1: Zisk vektoru proudění

6 NÁVRH MĚŘÍCIHO SYSTÉMU

Cílem této kapitoly je navrhnout systém, který bude zajišťovat obsluhu jednotlivých ultrazvukových měničů a dále z nich bude sbírat a zpracovávat data.

6.1 Blokové schéma

Na obr. 6.1 je znázorněno blokové schéma celého systému. Bloky v oblasti vyznačené červeným obdélníkem budou pro každou měřicí osu zvlášť (například pro pětiosý systém bude potřeba 10 zesilovačů, 10 přijímačů a 10 měničů). Bloky mimo tuto oblast jsou pro všechny měřicí osy společné. Celý systém je napájen ze sítě. Jako ultrazvukové měniče je potřeba použít obousměrné modely (tedy takové, které mohou pracovat jak v režimu vysílání, tak v režimu příjmu).



Obr. 6.1: Blokové schéma systému

6.2 Popis systému

Blokové schéma na obr. 6.1 znázorňuje systém sestávající z analogové a digitální části. Analogová část je podrobněji popsána v kapitole 7 a sestává ze zařízení pro buzení měničů (tedy generátor + zesilovač) a pro příjem a digitalizaci signálu z měničů. Tento systém musí fungovat v obou směrech. Hlavní problém plynoucí z tohoto faktu je ten, že přijímač musí vydržet vysoké výstupní napětí zesilovače, když bude měnič v režimu vysílání. Dalším problémem je odstavení signálu zesilovače, pokud bude měnič v režimu příjmu.

Digitální část je podrobně popsána v kapitole 8. Jejím úkolem je zajistit zmíněné odstavení signálu zesilovače při měniči v režimu příjmu a dále změřit čas přenosu samotného UZ signálu mezi měniči. Dále zajišťuje komunikaci s PC.

Napájení jednotlivých částí bude zajištěno zdrojem ± 50 V dodaným Ing. Jiřím Hofmanem. Dále bude systém obsahovat ± 5 V DC-DC měnič.

7 NÁVRH ELEKTRONIKY ANALOGOVÉ ČÁSTI MĚŘÍCIHO SYSTÉMU

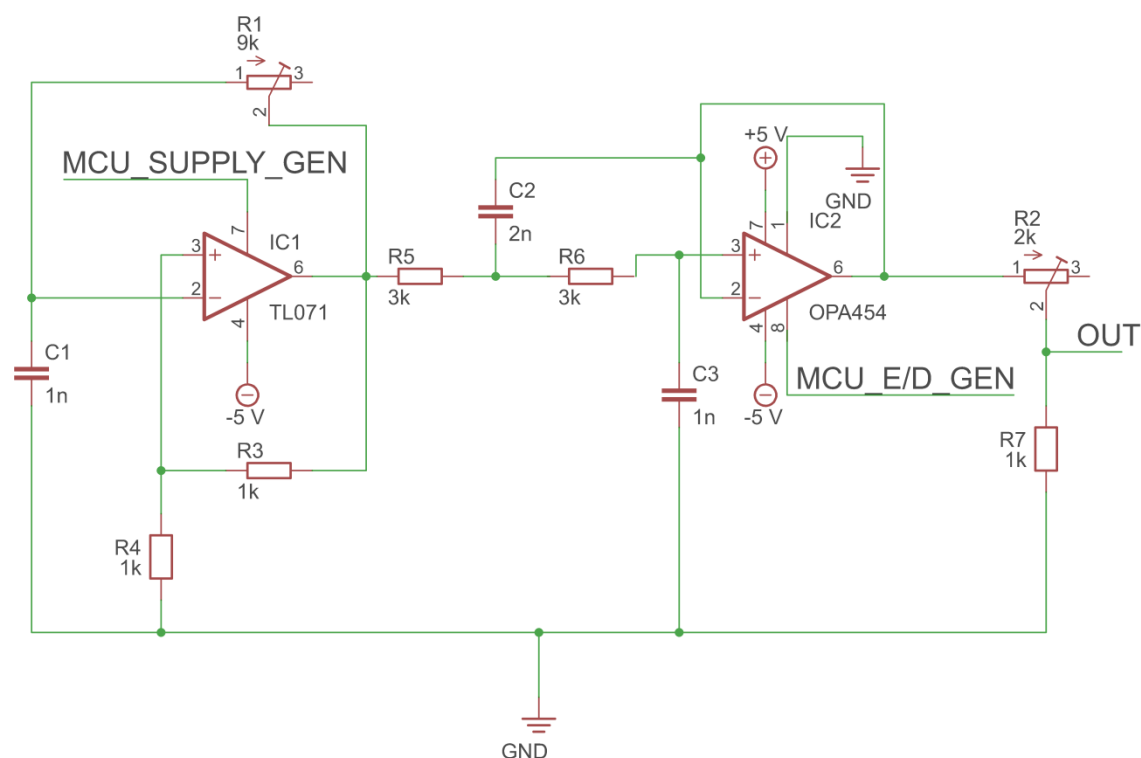
Cílem této kapitoly je navrhnout systém, který bude obsluhovat jednotlivé ultrazvukové měniče. Bude tedy zajišťovat buzení měničů a příjem výstupních signálů měničů. Tento výstupní signál bude dále zpracováván digitální částí systému.

7.1 Budič

Prvním problémem je potřeba vybudit měniče tak, aby byly jejich výstupní signály dostatečně silné pro detekci přijímací částí pro vzdálenosti odpovídající rozměrům FV panelu. Prototyp budovaný v této práci by měl mít výstupní signál s nastavitelnou frekvencí i amplitudou, aby bylo možné snadno upravovat budící signál měničů bez nutnosti zásahu do obvodu. Cílem je dosáhnout budící amplitudy napětí měniče přibližně 50 V a frekvence cca 41 kHz (tyto hodnoty vyplynuly z testů řešených v kapitole 9).

Tato vysoká amplituda napětí bude zajištěna zesilovačem (viz. níže), který pro tento výstupní signál vyžaduje vstupní signál o amplitudě přibližně 1 V.

Jako vhodné řešení takového budiče bylo zvoleno následující zapojení:



Obr. 7.1: Schéma budícího bloku

Operační zesilovače použity v tomto zapojení jsou TL071 [19] a OPA454[20]. Oba tyto zesilovače jsou vhodné pro provoz na 40 kHz frekvenci. OPA454 má navíc výhodu v možnosti vypnutí výstupu pomocí E/D pinu. To dělá z tohoto budiče vypínatelný generátor, čehož je dále v práci využito.

Toto zapojení sestává z generátoru čtvercového signálu, jehož frekvenci lze nastavit pomocí trimmru R1. Platí pro ni tento vztah:

$$f = \frac{1}{2 \cdot R1 \cdot C1 \cdot \ln(3)} \quad (7.1)$$

Zvýšením R1 lze tedy snížit frekvenci a naopak.

Druhá část obvodu je dolní propust známé topologie Sallen-Key s mezní frekvencí rovnou frekvenci čtvercového signálu. Ta odfiltruje frekvence tak, že ze signálu zůstane právě jedna harmonická (sinus).

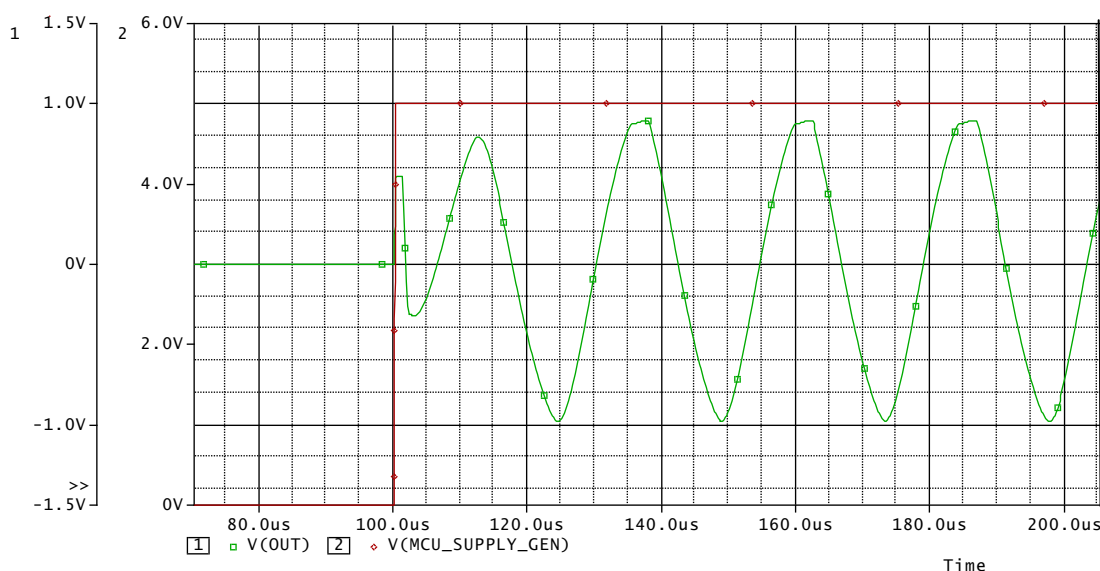
Na výstupu je dělič napětí s trimmrem R2, kterým lze nastavit amplitudu výstupního signálu.

Tento obvod byl odvozen ze zapojení v [1].

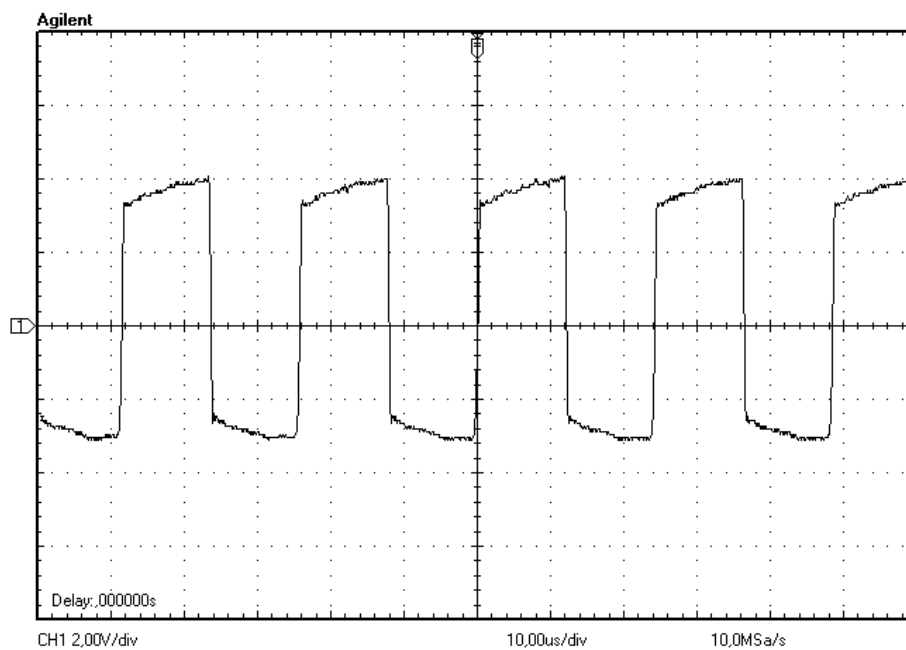
Kladné napájení prvního OZ je provedeno pomocí výstupního portu MCU (vysvětlení viz. kapitola 8).

Toto zapojení bylo simulováno pomocí programu PSpice s použitím PSpice modelů z [22] a [23], výstup simulace lze vidět na obr. 7.2. V simulaci je vidět aktivace budiče během cca 6,25 μ s po nastavení výstupu MCU v čase 100 μ s.

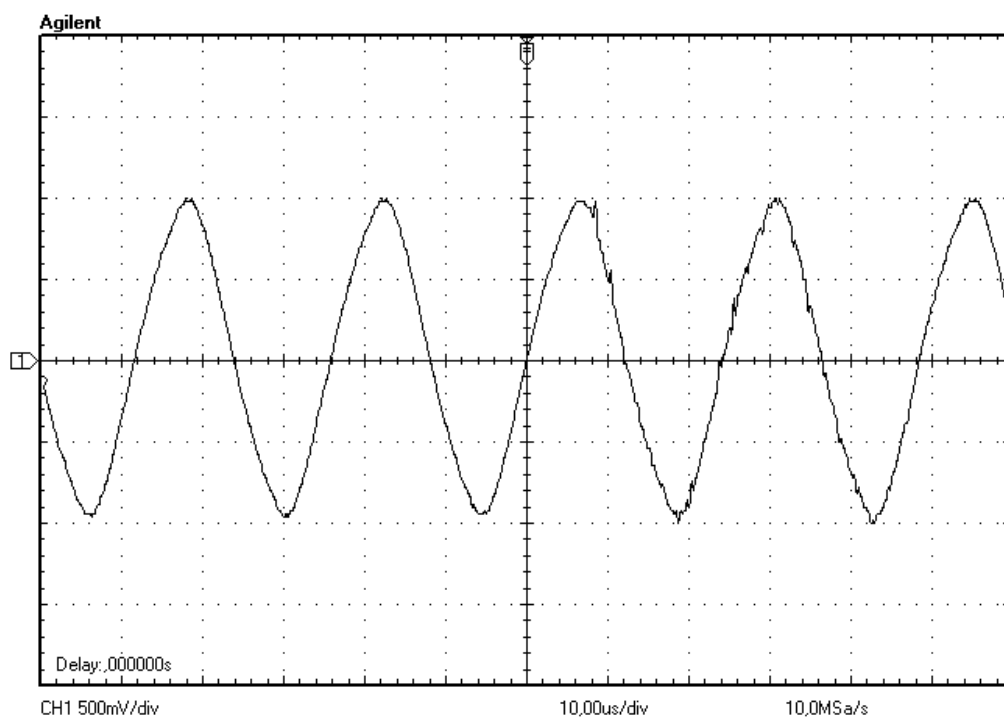
Dále je na obr. 7.3 vidět výstupní signál generátoru čtvercových vln a na obr. 7.4 výstupní sinusový signál celého budiče.



Obr. 7.2: Simulace budiče v PSpice



Obr. 7.3: Výstupní signál generátoru čtvercových vln



Obr. 7.4: Výstupní sinusový signál celého budiče

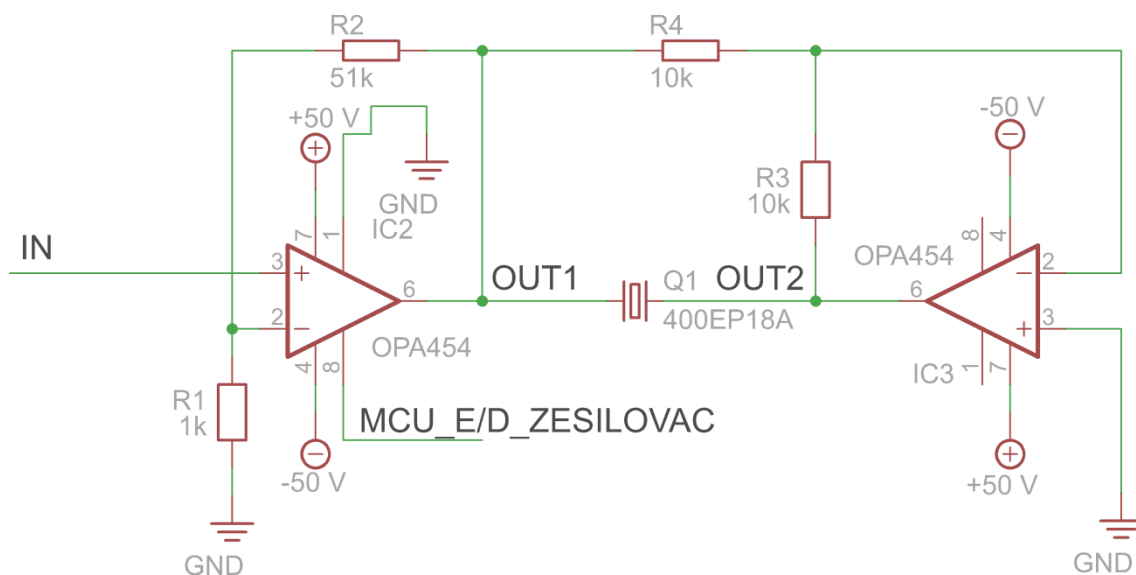
7.2 Zesilovač

Cílem zesilovače je zesílit vstupní signál z budiče na hodnotu vhodnou pro buzení UZ měničů. Jedná se tedy o zesílení přibližně 1 V signálu o frekvenci 40 kHz na 50 V. Dále bude tento budící signál ještě převrácen pro obousměrné buzení (princip je podobný jako u buzení reproduktorů). Zesilovač musí být stabilní pro kapacitní zátěž měničů (cca 3 nF).

I v tomto zapojení jsou použity zesilovače OPA454 [20], tentokrát opět pro jejich možnost vypnutí a také vysoký rozsah napájecího napětí (± 50 V), který umožňuje buzení měničů silným signálem.

Pro realizaci zesilovače bylo jako vhodné zvoleno můstkové zapojení z [20] (figure 71), které je doporučeno přímo pro buzení piezokrystalů.

Výsledný obvod zesilovače vypadá takto:



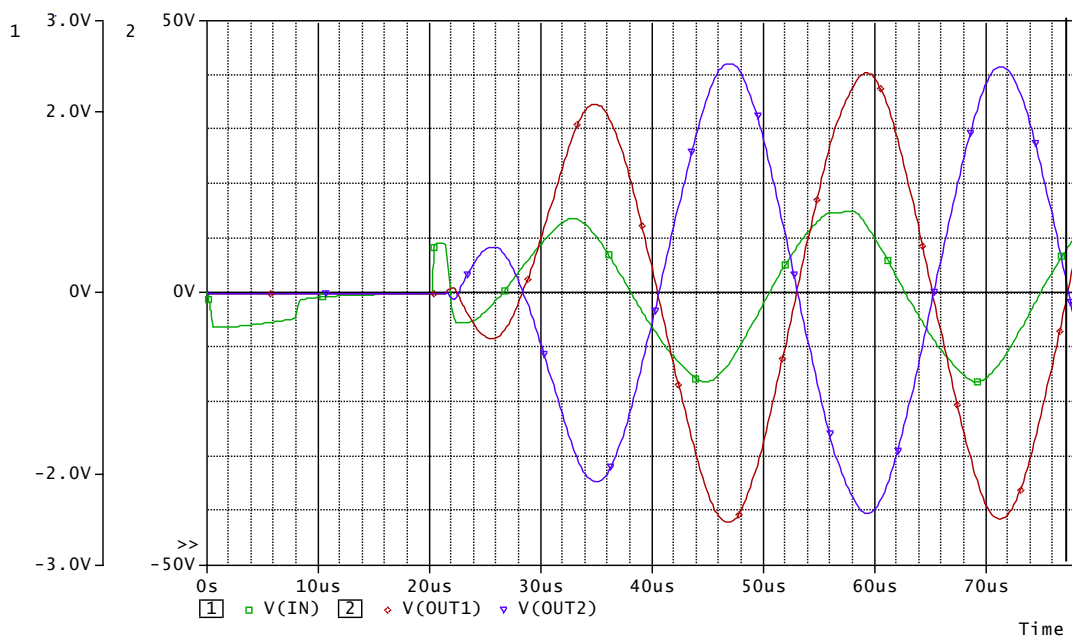
Obr. 7.5: Schéma bloku zesilovače

Toto můstkové zapojení sestává z obecně známých zapojení neinvertujícího a invertujícího zesilovače (jejich princip je popsán například v [21]). Hodnoty napětí na výstupech jednotlivých zesilovačů lze vyčíslit takto:

$$V_{out1} = V_{in} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7.2)$$

$$V_{out2} = -V_{out1} \quad (7.3)$$

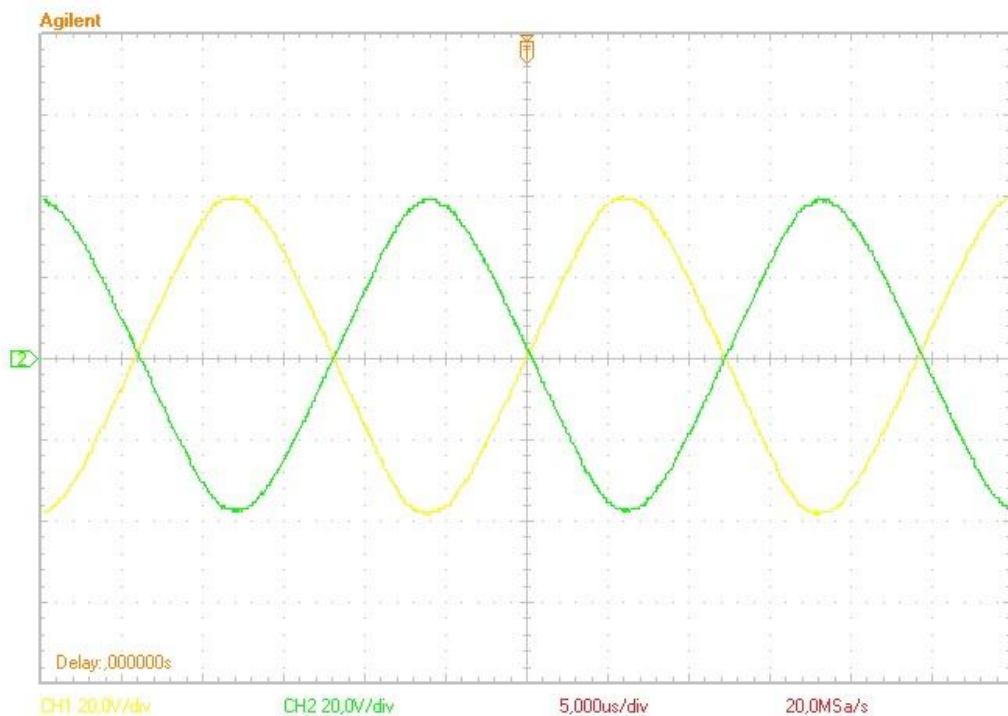
I toto zapojení bylo simulováno pomocí programu PSpice. Výstup simulace lze vidět na Obr. 7.6. MCU v čase 20 μ s aktivovalo budič a povolilo OZ v budiči i zesilovači, zesilovač na vstup reaguje s přibližně 1,75 μ s zpožděním.



Obr. 7.6: Simulace zesilovače PSpice

Obvod zesilovače nám tedy zajistí buzení měničů signálem o velikosti přibližně ± 50 V, což znamená rozdíl potenciálů až 100 V. Tímto bude bezpečně zajištěn přenos signálu na vzdálenosti odpovídající rozměrům FV panelu.

Na obr. 7.7 je výstup zesilovače na osciloskopu.



Obr. 7.7: Výstup zesilovače na osciloskopu

7.3 Ultrazvukový měnič

Ultrazvukové měniče jsou zařízení, která mění elektrický signál na signál akustický a naopak.

Jsou založeny na piezoelektrickém jevu. Piezoelektrický jev můžeme definovat jako elektrickou polarizaci krystalů vyvolanou mechanickou deformací. Převrácený piezoelektrický jev je charakterizován deformací krystalů působením přiloženého elektrického pole. Měníče při vysílání UZ signálu využívají převrácený piezoelektrický jev, kdy vlivem budícího střídavého napětí kolem dochází k oscilaci krystalu a generování zvukových vln. Při příjmu využívají měniče přímý piezoelektrický jev, kdy vlivem rozkmitání krystalu zvukovými vlnami dojde k elektrické polarizaci krystalu a generaci elektrického signálu. Problematika piezoelektrického jevu je podrobněji popsána v [25].

V této práci budou použity UZ měniče typu 400EP18A [9] (viz. obr. 7.8). Tyto měniče mohou plnit funkci vysílače i přijímače, mají širokou směrovou charakteristiku a jejich rezonanční frekvence se pohybuje okolo 40 kHz.

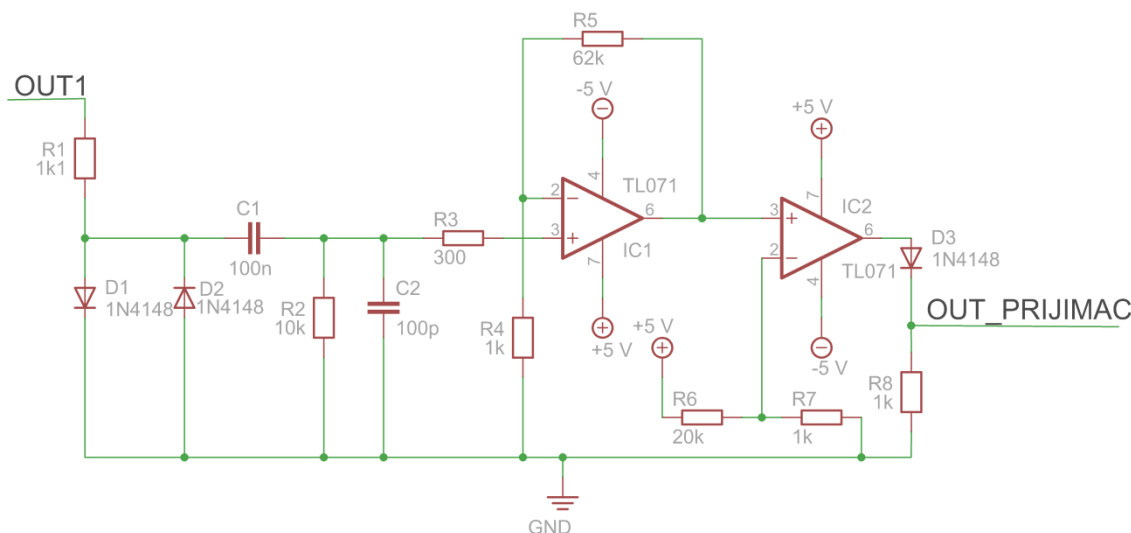
UZ měniče budou buzeny výstupním signálem bloku zesilovače a jejich signál bude přijímán blokem přijímače. Kvůli velkému vlivu rušení na jejich výstupní signál je nutné pro zapojení měničů použít stíněné vodiče.



Obr. 7.8: UZ měnič 400EP18A [9]

7.4 Přijímač

Úkolem bloku přijímače je zpracovat výstupní signál UZ měničů a vytvořit z něho digitální signál pro vyvolání přerušení na MCU. Tento výstupní signál se pohybuje v řádu desítek mV (viz. kapitola 9). Obvod přijímače byl navržen takto:



Obr. 7.9: Přijímač

První část obvodu slouží k ochraně proti signálu zesilovače při měniči v režimu vysílání (R1, D1 a D2). Na diodách bude jejich U_d napětí a vznikne úbytek napětí na R1. Kvůli velkému výkonovému zatížení je R1 realizován pěti sériově zapojenými 220 Ω rezistory.

Druhá část obvodu je pásmová propust, která má za úkol zkvalitnit signál pro další zpracování (tedy odfiltrovat nežádoucí složky). Tato propust je realizována pasivními součástkami (jedná se o RC horní propust C1+R2 následovanou RC dolní propustí C2+R3). Mezní frekvence jsou nastaveny na 159 Hz a 5,3 MHz. Tímto bude zajištěna filtrace parazitního signálu ze sítě a vysokofrekvenčních signálů a zároveň nedojde k útlumu zpracovávaného 40 kHz signálu.

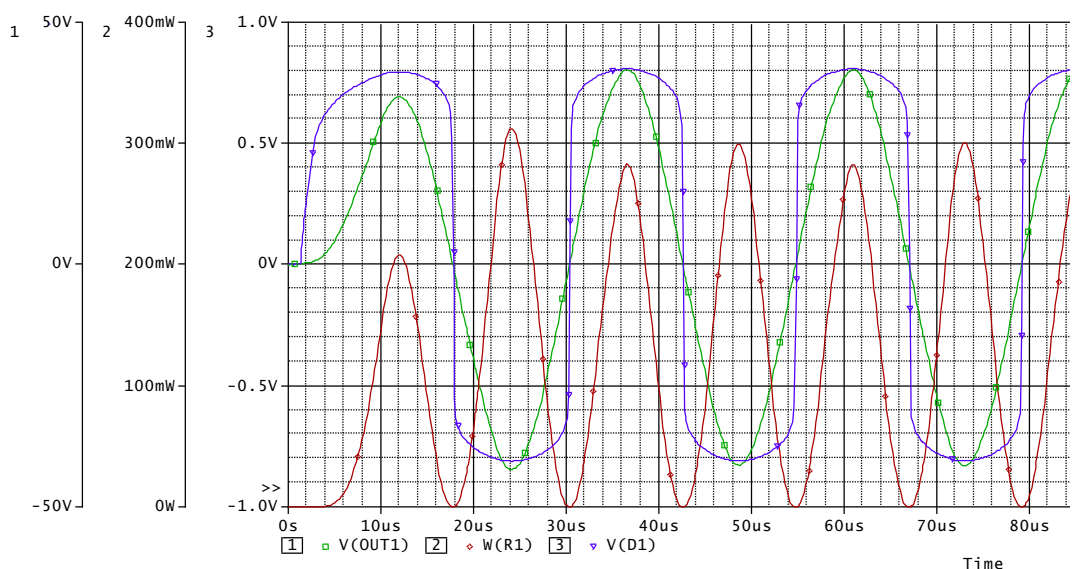
Třetí část obvodu je neinvertující zesilovač (použitý už v bloku zesilovače) se zesílením 63. Ten zesílí přijímaný signál ze zmíněných desítek mV na jednotky voltů.

Zesílený signál je digitalizován komparátorem, který má na druhý vstup přivedenou konstantní úroveň napětí cca 240 mV danou děličem R6 a R7. Výsledný signál je pomocí diody D3 usměrněn a vzniklý digitální výstup je vyveden na přerušení MCU.

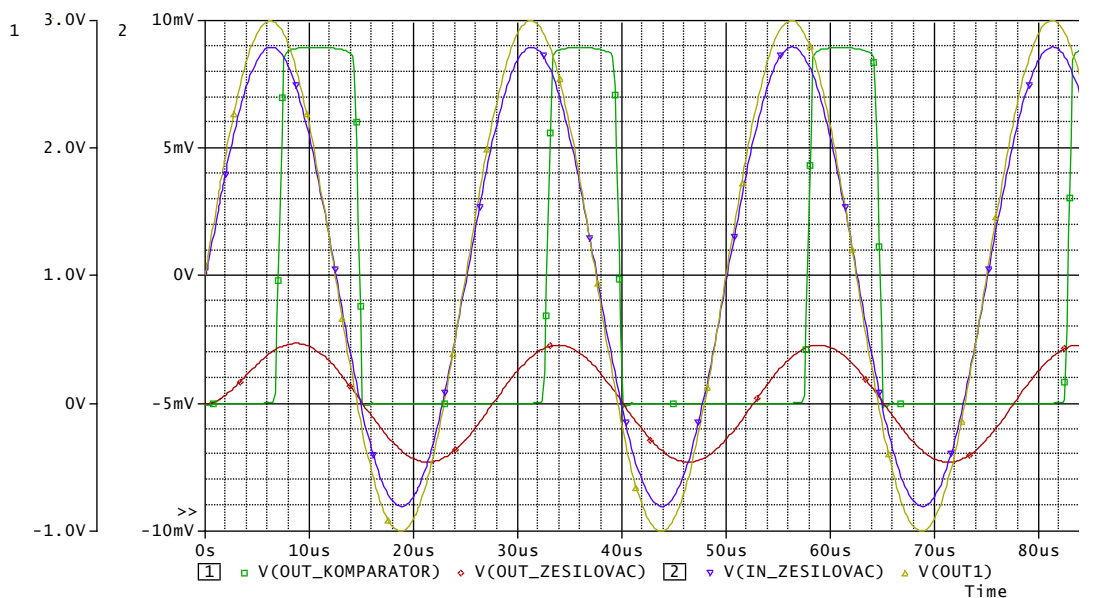
Na simulaci na obr. 7.10 je vidět přijímač při aktivním zesilovači, tedy výstupní signál zesilovače, napětí na diodách a výkonové zatížení rezistoru R1. Na další simulaci na obr. 7.11 je proces zpracování signálu o amplitudě 10 μ V, který představuje výstupní signál měniče. Dále jsou na obr. 7.11 vidět vstupní a výstupní signály zesilovače. Vstupní signál je vzhledem k výstupnímu signálu měniče lehce utlumen pásmovou propustí, výstupní signál zesilovače dosahuje hodnot až 0,5 V (i pro takto nízko

nastavený signál měniče), což bezpečně stačí k překročení 0,24 V překlápěcí hodnoty komparátoru. Naměřené zpoždění mezi počátkem sinusového signálu a sestupnou hranou výstupu přijímače bylo 14,5 μs . Společně se zpožděním budiče a zesilovače tedy vznikne celkové teoretické zpoždění obvodu 23 μs .

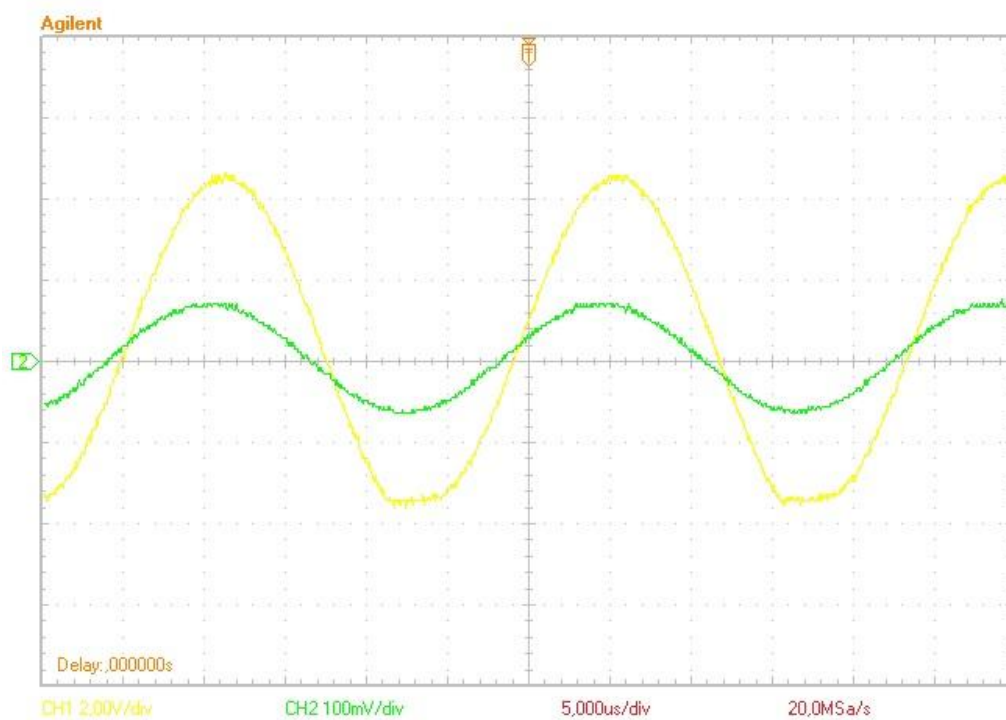
Na obr. 7.12 je reálný výstup měniče a zesilovače z osciloskopu [25]. Na obr. 7.13 je výstup zesilovače s výstupem komparátoru, opět z osciloskopu [25].



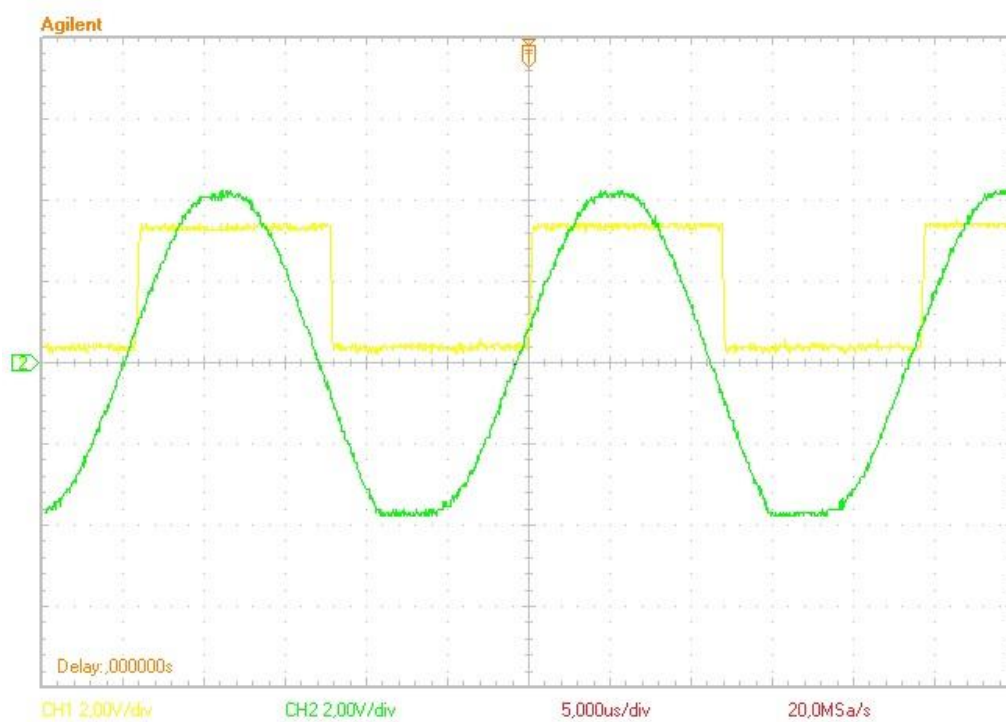
Obr. 7.10: Simulace přijímače s aktivním zesilovačem



Obr. 7.11: Simulace přijímače při zpracovávání signálu z UZ měniče



Obr. 7.12: Výstupní signál měniče s výstupem zesilovače z osciloskopu [25]



Obr. 7.13: Výstupní signál zesilovače a komparátoru osciloskopu [25]

8 NÁVRH DIGITÁLNÍ ČÁSTI MĚŘÍCIHO SYSTÉMU

Tato kapitola se zabývá návrhem digitální části systému, která je realizována pomocí MCU s výstupem na PC.

8.1 Požadavky na mikrokontrolér

Systém vyžaduje pro každý použitý měnič jedno externí přerušení a jeden výstupní port. Dále je potřeba jedna časovací jednotka pro celý systém, v capture režimu. Poslední požadovaná záležitost je jeden výstupní port pro kontrolované napájení budícího OZ. Výstupní port nastavuje E/D pin operačního zesilovače opa454 (tedy zapíná a vypíná blok zesilovače) a přerušení reaguje na výstupní signál přijímače. Časovací jednotka měří počet hodinových pulzů uplynulých od aktivace zesilovače do příjmu signálu na přijímači.

MCU musí být dostatečně rychlé pro měření malých časových rozdílů způsobených prouděním vzduchu. Aby systém změřil proudění o rychlosti $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ na 0,5 metru vzdálenosti, musí být schopen změřit rozdíl času 430 ns (pro větší vzdálenosti je tento rozdíl vyšší, např. pro 1 m stačí pro změření $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ proudění změřit rozdíl času 860 ns).

8.2 Mikrokontrolér Renesas 78K0R/FG3

Jako vhodný MCU pro tyto potřeby byl zvolen mikrokontrolér 78K0R/FG3 [27] od firmy Renesas. Jedná se o 16 bitový MCU s maximální frekvencí 24 MHz (minimální doba vykonání instrukce je 42 ns). Má 89 I/O portů, 16 bitový časovač s 24 kanály a 8 externích přerušení. Z těchto vlastností plyne největší omezení z počtu externích přerušení, které takto určuje maximální počet UZ měničů na 8 (tedy systém sestávající ze 4 párů měničů).

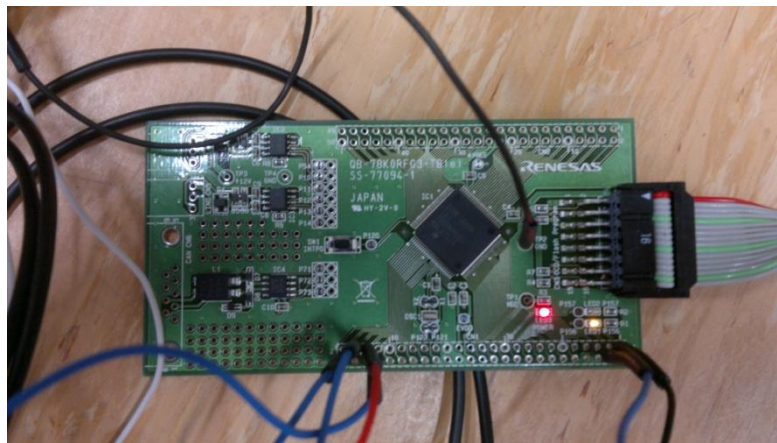
MCU je instalován na demo boardu [28]. Tento demo board obsahuje konektory s vyvedenými piny MCU, 2 LED diody pro snadnější kontrolu průběhu programu, jednu LED diodu indikující napájení, jedno tlačítko a 16 pinový konektor pro debugger MINICUBE2 [26].

8.3 Vývojový diagram programu mikrokontroléru

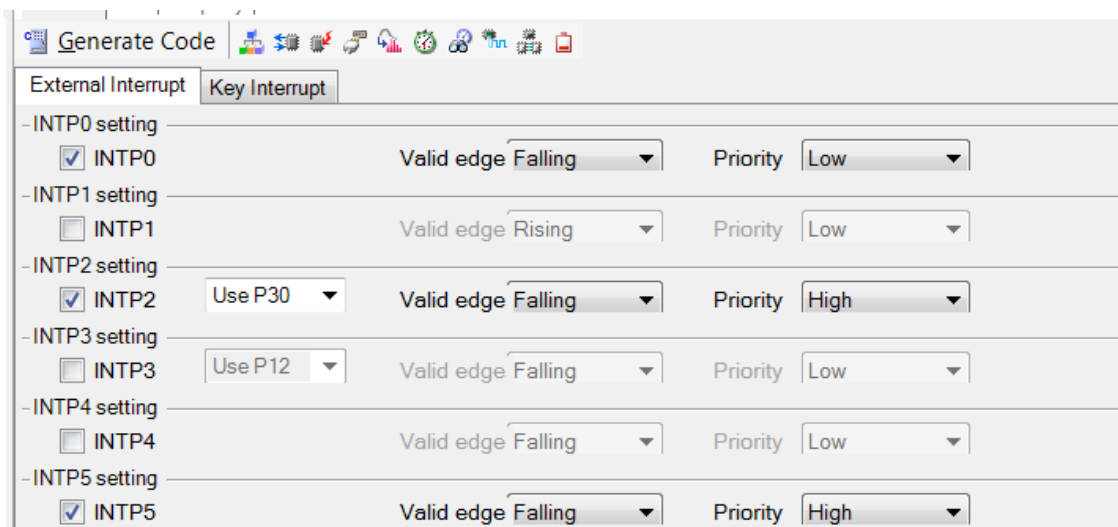
Program MCU se chová podle obr. 8.3. Běh programu je kontrolován využitím testovacích diod na demo desce MCU. Jedna dioda svítí při probíhající měření a nesvítí, pokud měření neprobíhá. Druhá dioda změni svůj stav pokaždé při vyslání měřícího pulzu.

Programování mikrokontroléru bylo provedeno pomocí programu IAR Embedded Workbench [29]. Pro práci byla použita freeware verze programu s omezením velikosti kódu do 16 KB a s neomezenou dobou používání. Dále byl k tvorbě kódu využit nástroj Applilet [30], který je opět zdarma a slouží k vygenerování kódu pro inicializaci procesoru a jeho periférií.

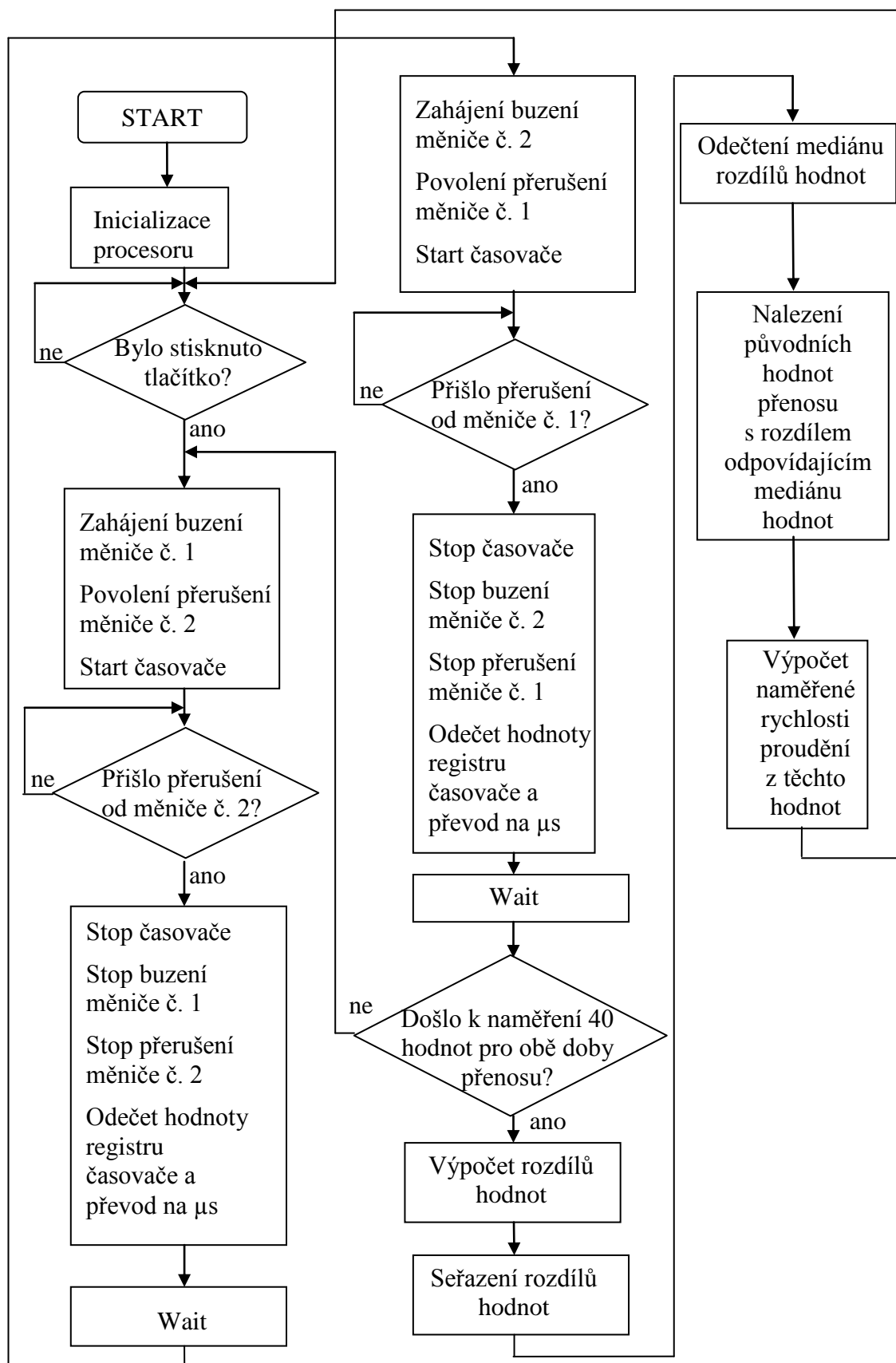
Na obr. 8.1 je tento MCU při měření a na obr. 8.2 je náhled generování kódu pro periférie pomocí nástroje Applilet. Samotný kód programu je k nahlédnutí v příloze D, přičemž jsou uvedeny pouze kódy, které psal sám autor (tzn. kódy nastavení periférií pomocí programu Applilet byly vynechány).



Obr. 8.1: MCU RL78K0R [27] při měření



Obr. 8.2: Nastavení přerušení pomocí programu Applilet



Obr. 8.3: Vývojový diagram programu MCU

9 TESTY POUŽITÉHO HARDWARE

V rámci práce byly provedeny různé testy použitého hardwaru. Prvním testem bylo zjišťování stability bloku zesilovače při kapacitní zátěži. Druhý test se zabýval měřením frekvenční charakteristiky UZ měničů při různých teplotách. Třetí testování mělo za úkol prověřit směrovou charakteristiku měničů. Poslední test zjišťoval závislost amplitudy výstupu přijímacího měniče na vzdálenosti měničů. Všechny tyto testy byly provedeny na nepájivém kontaktním poli a v době testování ještě nebyl sestaven budící blok popsany v kapitole 7, proto byl místo něho použit laboratorní generátor TESLA BM 492 [31], který je zobrazen na obr. 9.1.



Obr. 9.1: Generátor TESLA BM 492 [].

9.1 Testy stability zesilovače

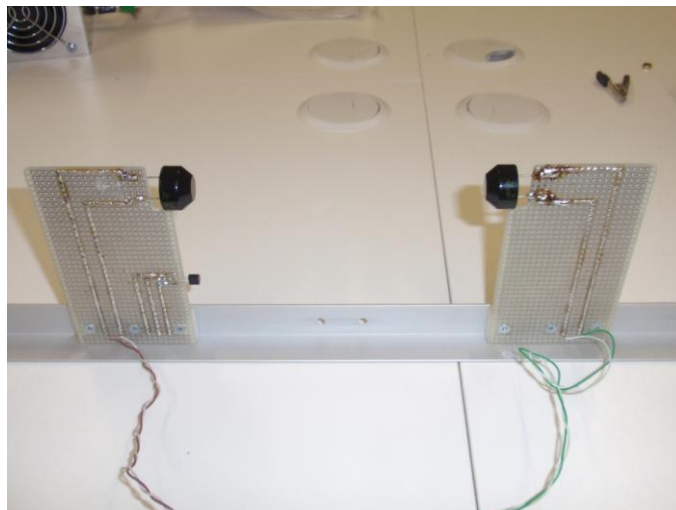
Měniče použité v práci mají dle [9] kapacitu cca 3 nF. Test stability zesilovače byl proveden až do hodnoty kapacity 4,5 nF. Dále byl zesilovač také testován při zatížení samotným UZ měničem. Zesilovač byl při všech těchto testech stabilní.

9.2 Frekvenční charakteristika ultrazvukových měničů

Měniče 400EP18A [9] mají dle datasheetu centrální frekvenci 40 ± 1 kHz. Tato frekvence je závislá především na teplotě. Cílem tohoto testu bylo zjistit optimální budící frekvenci pro laboratorní podmínky a dále také pro jinou teplotu, aby bylo možné odhadnout vliv teploty na tuto centrální frekvenci.

9.2.1 Způsob měření v laboratoři

Pro měření byly použity měniče buzeny zesilovačem. Signály byly měřeny pomocí osciloskopu [25]. Jako generátor signálu pro buzení zesilovače byl použit generátor. Zesilovače byly buzeny sinusovým signálem o amplitudě 0,65 V, frekvence byla nastavována v rozsahu 40 kHz až 42 kHz. Výstupní signál zesilovače (signál budící měniče) dosahoval amplitudy ± 25 V. Vzdálenost měničů byla pro testovací účely nastavena na 20 cm (viz. obr. 9.2). Protože se střední frekvence velmi pravděpodobně bude lišit pro různé měniče, byla frekvenční charakteristika naměřena pro dva různé páry měničů.



Obr. 9.2: UZ měniče při měření

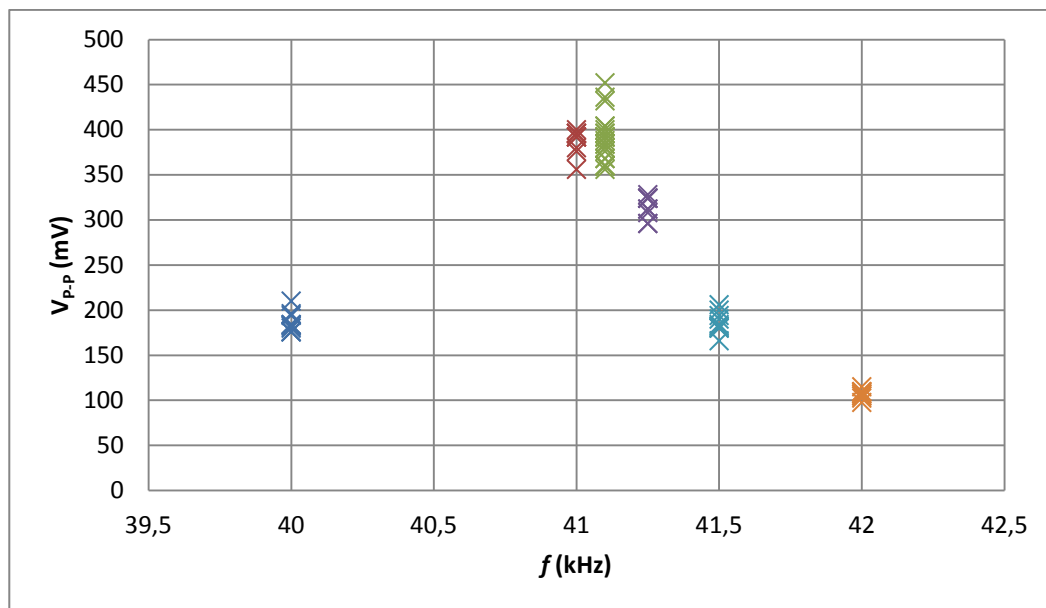
9.2.2 Výsledky měření v laboratoři

Pro první pár měničů byla naměřena charakteristika na obr. 9.3. Je vidět, že frekvenční závislost přenosu měničů je velmi vysoká. Jako ideální budící frekvence byla naměřena hodnota 41 kHz.

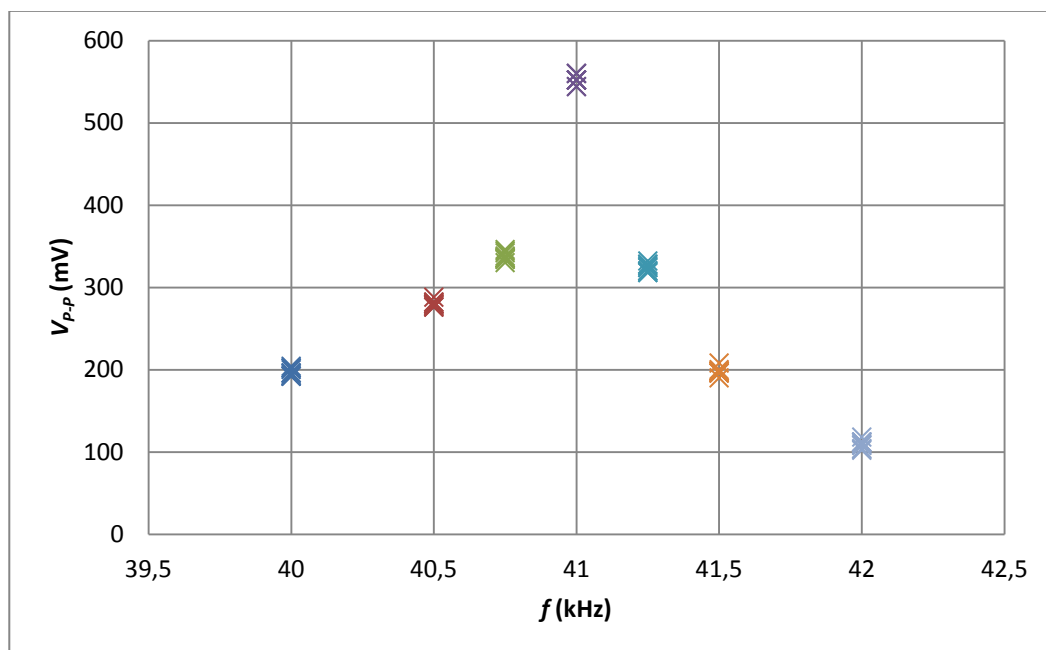
Pro druhý pár měničů byla naměřena charakteristika na obr. 9.4. Opět lze pozorovat velkou frekvenční závislost přenosu. Ideální budící frekvence byla opět naměřena na hodnotě 41 kHz.

Výsledky tohoto měření jsou pro další vývoj systému velice dobré. Je totiž pravděpodobné, že měniče [9] se v hodnotě ideální budící frekvence neliší. Toto tvrzení bude samozřejmě nutné ověřit přeměřením dalších měničů.

Poznámka: V grafech je zobrazena hodnota V_{P-P} na měniči, nikoliv amplituda.



Obr. 9.3: Frekvenční charakteristika prvního páru měničů



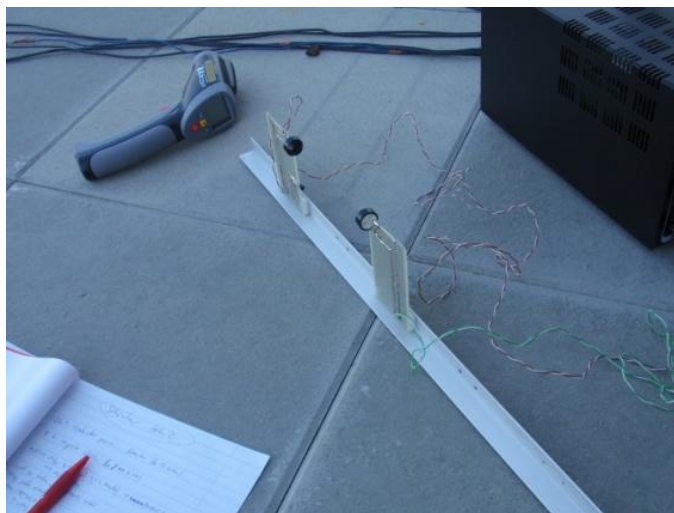
Obr. 9.4: Frekvenční charakteristika druhého páru měničů

9.2.3 Frekvenční charakteristika při různých teplotách

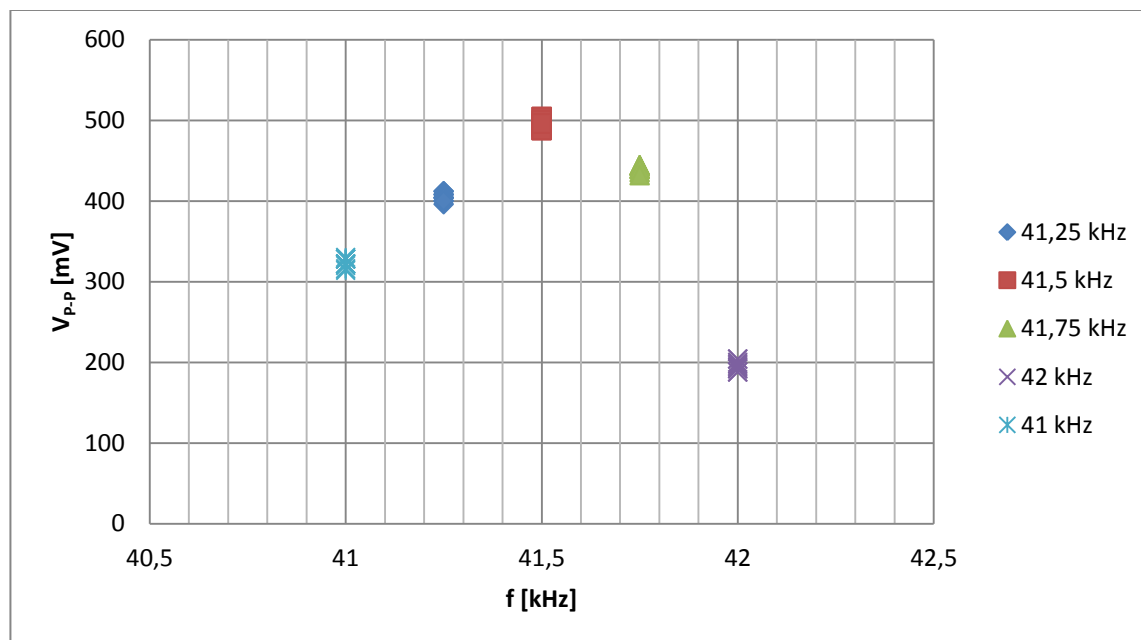
Jak bylo zmíněno výše, měření probíhalo při různých atmosférických teplotách. Doposud bylo tedy měřeno při teplotě 11 °C, což lze porovnat s měřením při 24,5 °C v laboratoři.

Systém měření byl použit obdobný jako při minulých testech. K měření teploty byl využit digitální teploměr (viz. obr. 9.5).

Na obr. 9.6 je zobrazena naměřená charakteristika pro 11 °C.



Obr. 9.5: Měření ideální frekvence při 11 °C



Obr. 9.6: Frekvenční charakteristika při teplotě 11 °C

9.2.3 Závěry z měření frekvenční charakteristiky při různých teplotách

Měřením byla prokázána závislost ideální budicí frekvence na teplotě. Při rozdílu teplot cca 15 °C byl naměřen rozdíl ideální budicí frekvence 0,5 kHz. Při určité teplotě je možné, že dosavadní systém buzený frekvencí 41 kHz nebude schopen dosáhnout na přijímači dostatečné amplitudy pro detekci signálu.

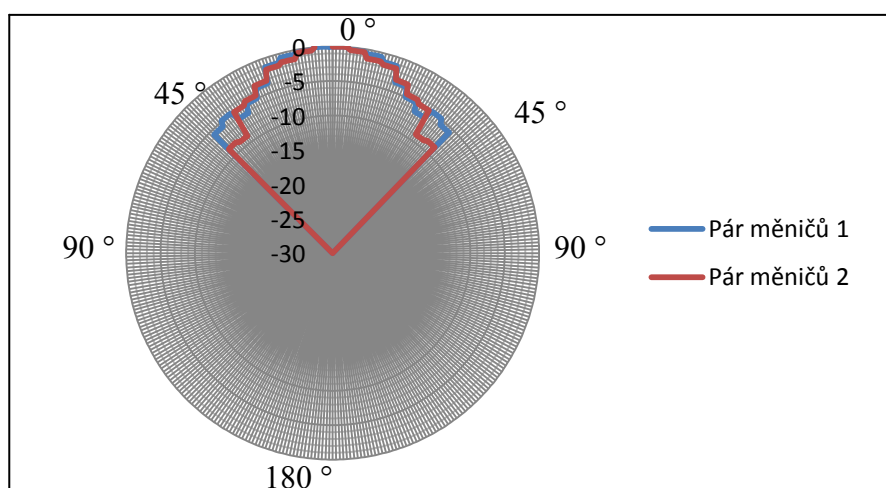
Tento problém je vyřešen pomocí trimru v bloku přijímače, kterým lze budicí frekvenci volit (viz. kapitola 7.1).

9.3 Směrová charakteristika ultrazvukových měničů

Důležitým parametrem je směrová charakteristika měničů. Jedná se o rozptyl vyzářeného UZ v prostoru. Měniče mají tuto charakteristiku znázorněnou v [9], kde se udává, že měnič vyzařující pod úhlem 30° dosahuje útlum pouze 4 dB. To znamená, že vysílající měnič vychýlený o 30° vybudí přijímací měnič na hodnotu rovnou asi 63% původní hodnoty při odchylce 0°. Na výchylce 45° je útlum 6 dB, přenos je tedy pořád efektivní až z 50%.

9.3.1 Naměřené směrové charakteristiky

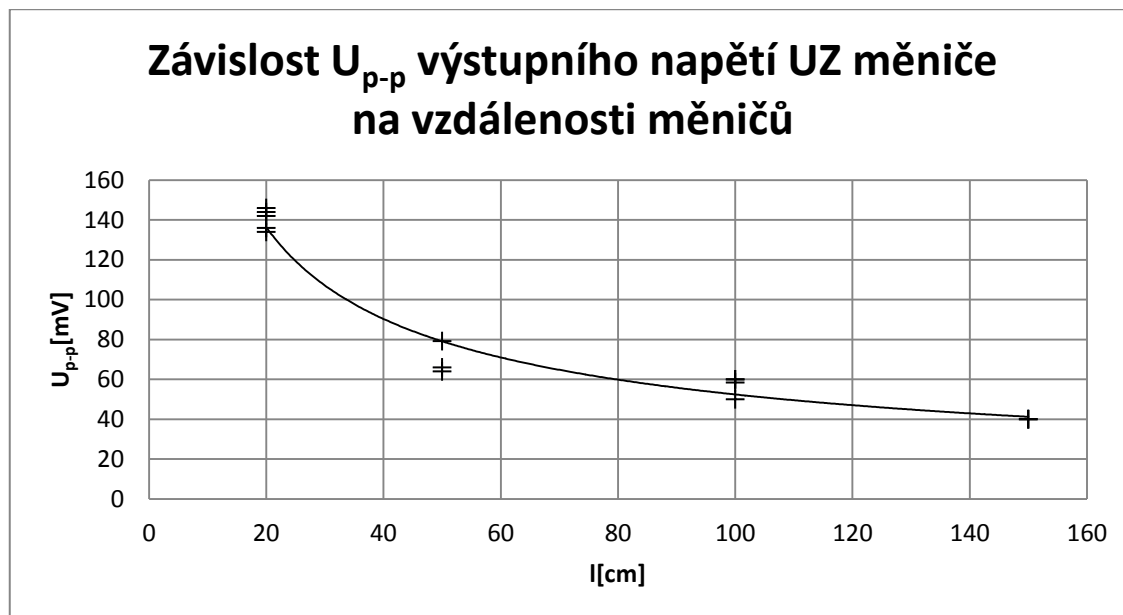
K naměření směrových charakteristik měničů byl použit stejný systém jako při měření frekvenční charakteristiky, použita byla ideální frekvence buzení 41 kHz. Úhel odchylky měniče byl nastavován pomocí úhloměru. Měření bylo opět provedeno pro dva páry měničů. Výsledky jsou graficky vyobrazeny na obr. 9.7 (v souladu s [9] jsou výsledky vyčísleny v decibelech). Odchylky nad 45° již měřeny nebyly. Je vidět, že směrová charakteristika v [9] je velmi podobná s naměřenou charakteristikou a odlišnosti jsou minimální. Konkrétně například pro 15° udává [9] -2,0 dB, naměřeny byly -1,7 dB a -1,3 dB, pro 30° udává [9] -4,0 dB a naměřeny byly -5,0 dB a -6,2 dB a pro 45° udává [9] -6 dB a naměřeny byly hodnoty -5,7 dB a -8,6 dB.



Obr. 9.7: Směrová charakteristika (svislá osa – dB, kruhová osa – stupně)

9.4 Přenos signálu mezi měniči na různých vzdálenostech

Tyto testy se zabývají měřením výstupních průběhů UZ měniče při různých vzdálenostech. Měnič byl buzen signálem o frekvenci 40 kHz. Výstupní napětí podle očekávání s rostoucí vzdáleností exponenciálně klesalo (obr. 9.8).



Obr. 9.8: Závislost U_{P-P} výstupního napětí UZ měniče na vzdálenosti měničů

10 REALIZACE SYSTÉMU

Cílem této kapitoly je realizovat systém vhodný pro měření rychlosti vzduchu v aerodynamickém tunelu a na reálné instalaci FV panelu. Elektronika bude umístěna v laboratoři, proto nejsou potřeba ochranné prvky proti klimatickým vlivům. Dalším požadavkem na systém je možnost jeho rozšíření o další páry UZ měničů.

10.1 Nepájivé kontaktní pole

Nepájivé kontaktní pole bylo využito pro základní vývoj jednotlivých zapojení, ale pro řešení prototypu celého systému není vhodné.

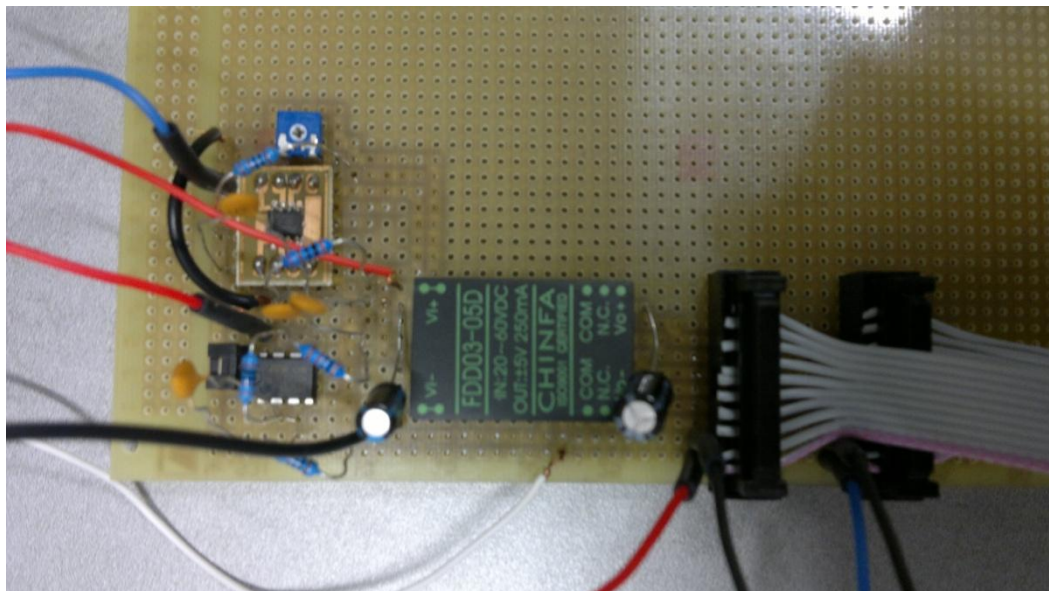
10.2 Univerzální plošný spoj

Pro testování je univerzální plošný spoj velmi dobrým řešením díky jeho větší flexibilitě.

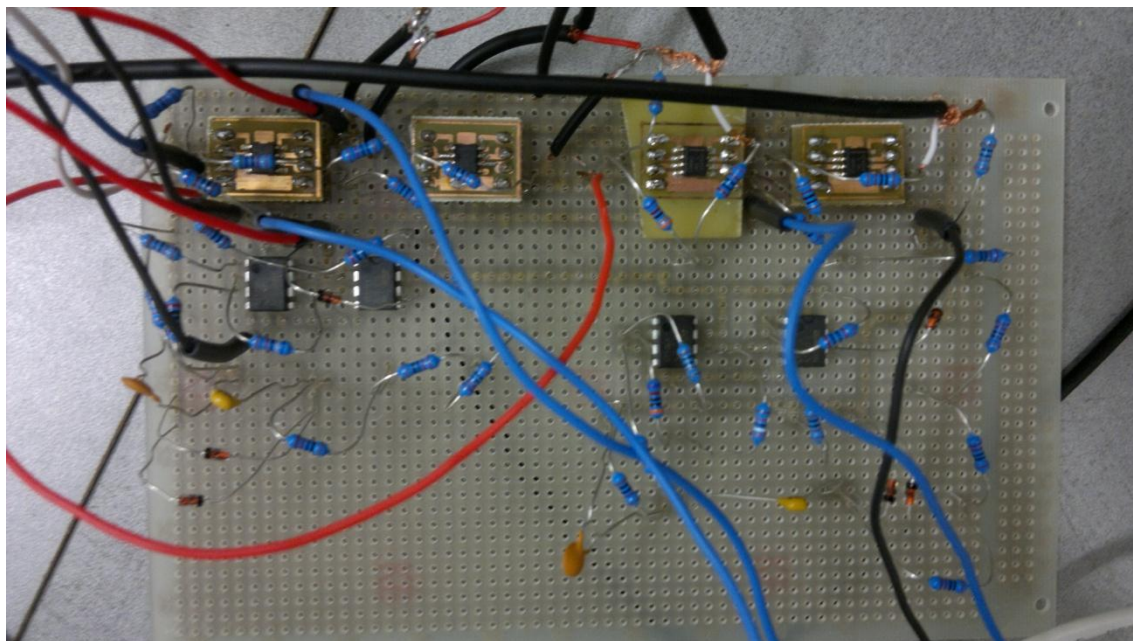
Pomocí prototypu zhotoveného na univerzálním spoji bylo možné optimalizovat celý systém pro požadované podmínky a dále navrhnout a vyrobit tradiční DPS pro finální zařízení.

Ve finálním prototypu je univerzálním plošným spojem řešeny pouze bloky společné pro všechny měniče (tedy budič a zdroj) a ostatní bloky jsou nahrazeny DPS z kapitoly 10.3.

Na obr. 10.1 lze vidět centrální modul a na obr. 10.2 je univerzální plošný spoj s bloky zesilovače a přijímače použitý pro testování systému.



Obr. 10.1: Centrální modul



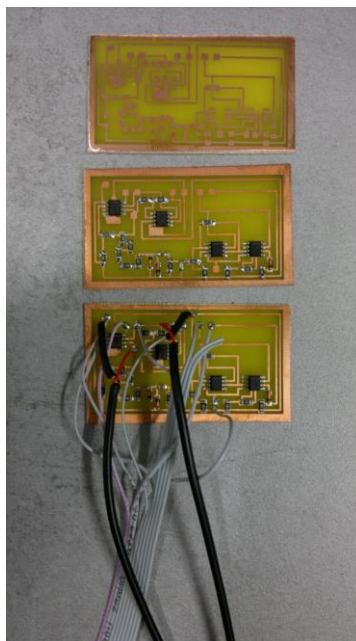
Obr. 10.2: Univerzální plošný spoj použitý pro testy

10.3 Deska plošných spojů

Pro finální prototyp je použit tradiční plošný spoj. Tento plošný spoj obsahuje bloky zesilovače a přijímače (tedy bloky, které je nutné pro každý měnič sestavit zvlášť). Každou z těchto DPS je možné napojit na centrální systém pomocí konektorů. Takto je možné k hlavnímu systému připojit libovolné množství těchto DPS, a systém je takto možné rozšířit o další páry UZ měničů. Pro snadnější manipulaci jsou DPS přilepeny v plastových konstrukčních krabičkách.

Na obr. 10.3 jsou zobrazeny tyto desky, nahoře je neosazená, uprostřed osazená a dole deska s vodiči a stíněnými kabely UZ měniče. Na obr. 10.4 je deska přilepena v konstrukční krabičce.

Návrh desky ve freeware verzi programu Eagle je v příloze B.



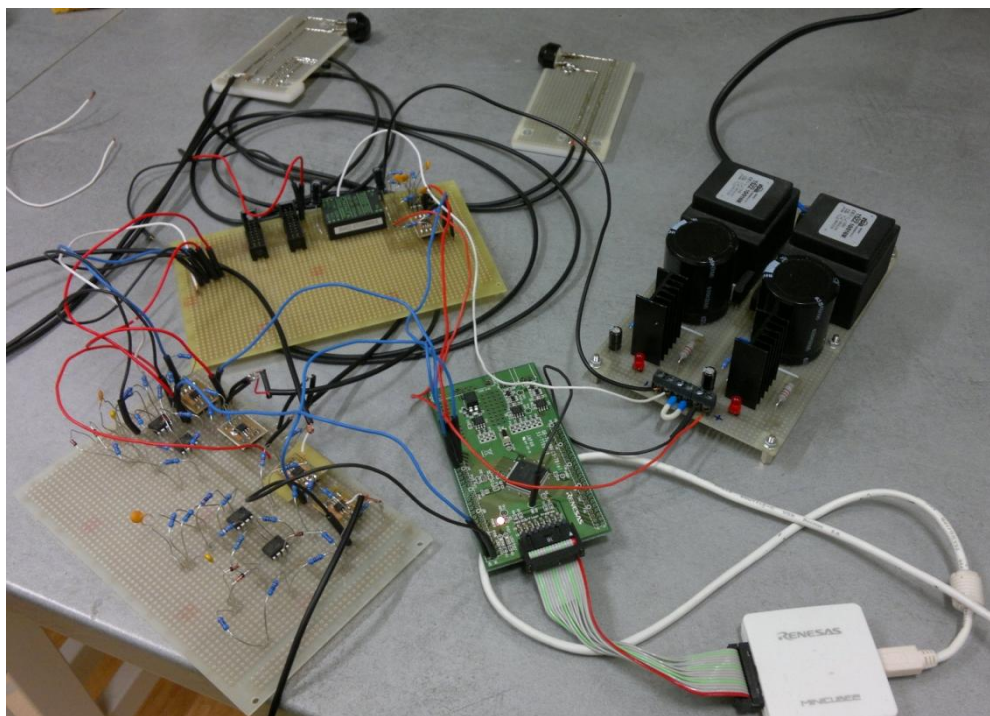
Obr. 10.3: Vyrobené DPS



Obr. 10.4: DPS umístěna v plastové konstrukční krabičce

11 MĚŘENÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU

V rámci práce je rovněž zahrnuto testování sestrojeného prototypu. Toto testování proběhlo jednak v laboratorních podmínkách v aerodynamickém tunelu Ing. Hofmana [8], a také na venkovní instalaci panelu. Na obr. 11.1 je zobrazen systém použit pro měření, aerodynamický tunel je k zhlédnutí v příloze A.



Obr. 11.1: Systém použit pro měření

11.1 Měření v aerodynamickém tunelu

Měníče byly umístěny do zmíněného tunelu (viz. Příloha A) způsobem zobrazeným na obr. 11.2. Výsledky měření byly porovnány s charakteristikami tunelu v [8] a také s komerčním miskovým anemometrem TX20ETH [14]. Tento anemometr nebylo možné do tunelu vložit kompletně, protože je příliš velký, proto bylo měření provedeno u ústí tunelu ve výši UZ měničů (viz. obr. 11.3). Pro měření byla zvolena vzdálenost měničů 0,5 m. Před samotným výpočtem byla provedena kalibrace při bezvětrí. Ta spočívala v odečtení 40 μs od přenosu při měniči č. 1 (číslování měničů je podle diagramu na obr. 8.2) jako vysílače a měniči č. 2 jako přijímače, protože při bezvětrí vykazoval tento směr právě o 40 μs delší přenos, způsobený zřejmě odchylkami parametrů součástek v obvodu. Dále bylo od celkového přenosu odečteno 233 μs , což byla odchylka naměřených hodnot od předpokládané doby přenosu v laboratorních podmínkách (tedy 1449 μs), která plyne ze zpoždění jednotlivých prvků v obvodu. Simulace v kapitole 7 určily zpoždění obvodu pouze 23 μs , což reálné hodnotě zcela jistě neodpovídá, proto byla hodnota zpoždění určena takto.

Rychlost proudění v tunelu byla nastavována přes ovládací program Ing. Hofmana pomocí volby šířky PWM signálu. Výsledky jsou k nahlédnutí v tab. 11.1. Pro každou hodnotu PWM signálu bylo provedeno 10 měření jak pomocí UZ zařízení, tak pomocí miskového anemometru TX. Software tunelu bohužel neměřil otáčky motoru, proto byla referenční hodnota určena podle grafů v [8] z hodnoty PWM. Pro přehlednost tabulky byla pro určení divergence použita směrodatná odchylka místo výčtu hodnot. Při normálním rozdělení se 68% hodnot liší od průměru o maximálně jednu směrodatnou odchylku a 95% hodnot maximálně o 2 dvě směrodatné odchylky.



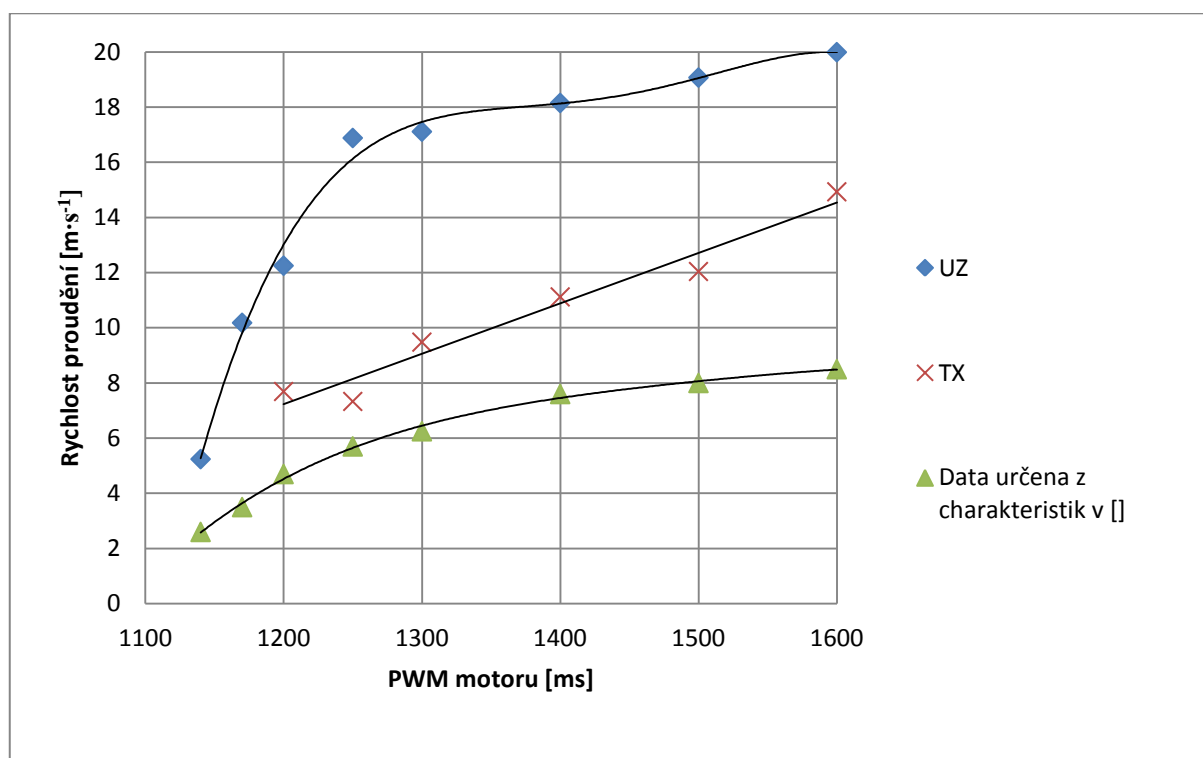
Obr. 11.2: Umístění UZ měničů v tunelu



Obr. 11.3: Měření pomocí anemometru TX20ETH [14]

Tab. 11.1: Výsledky měření v aerodynamickém tunelu

PWM [ms]	Rychlost UZ [m·s ⁻¹]	Směrodatná odchylka UZ [m·s ⁻¹]	Rychlost TX [m·s ⁻¹]	Směrodatná odchylka TX [m·s ⁻¹]	Rychlost podle [8] [m·s ⁻¹]	Poměr UZ/M	Poměr TX/M	Poměr UZ/TX
1000	0,01	1,14	0	0	0	N/A	N/A	N/A
1140	5,24	0,79	0,7	1,25	2,6	2,02	N/A	N/A
1170	10,18	1,27	2,55	2,89	3,5	2,91	N/A	N/A
1200	12,25	2,65	7,69	1,43	4,7	2,61	1,64	1,59
1250	16,88	3,74	7,33	2,58	5,7	2,96	1,29	2,30
1300	17,11	4,19	9,48	1,55	6,25	2,74	1,52	1,80
1400	18,15	5,44	11,12	2,17	7,6	2,39	1,46	1,63
1500	19,07	2,69	12,04	1,18	8	2,38	1,51	1,58
1600	19,99	2,72	14,93	2,87	8,5	2,35	1,76	1,34



Obr. 11.4: Závislost naměřené hodnoty proudění na PWM motoru

11.2 Zhodnocení měření v aerodynamickém tunelu

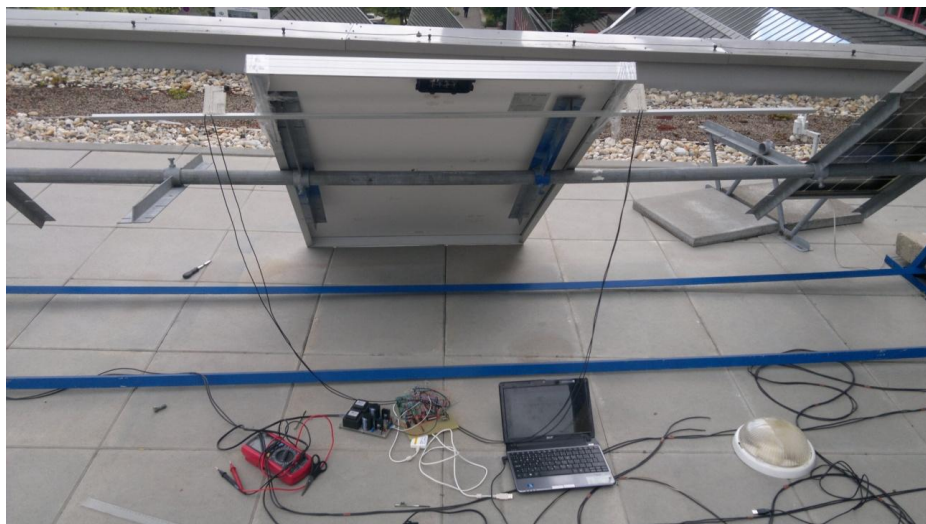
Měření v aerodynamickém tunelu mělo velmi zajímavé výsledky. Každé z použitých měřících zařízení naměřilo odlišné hodnoty, které se navíc lišily od hodnot naměřených Ing. Hofmanem v [8]. Miskový anemometr byl méně citlivý na nízkých hodnotách proudění. Obě měřící zařízení navíc vykazují rozptyl hodnot, což ale mohlo být způsobeno nepravidelným prouděním vzduchu v tunelu. Také je nutno zmínit, že měniče měřily rychlost vzduchu v jiném místě tunelu než miskový anemometr.

Dobrá zpráva je, že výsledné hodnoty jsou mezi sebou vždy v poměrně stejném poměru, tedy 2,5 mezi UZ systémem a hodnotami z [8], 1,5 mezi miskovým anemometrem a hodnotami z [8] a 1,7 mezi UZ systémem a miskovým anemometrem (viz. tab. 11.1). Z tohoto faktu lze usoudit, že systémy měřily dobře a naměřené hodnoty byly pouze špatně vypočítány. Z faktu, že anemometr [14] je komerční a na rozdíl od UZ systému vyvíjeného v této práci prošel kalibrací, je možné uvažovat, že pravdivější hodnoty byly naměřeny právě tímto měřičem. Nicméně UZ systém je funkční a po správné kalibraci má potenciál být velmi přesný a především mnohem přesnější pro malé rychlosti proudění větru.

11.3 Měření na venkovní instalaci panelu

Tato kapitola se zabývá měřením na venkovní instalaci panelu. Měření probíhalo při teplotě cca 20 °C a za poměrně výrazného proudění větru, naměřená hodnota proudění by ale měla být malá, protože systém měří rychlost proudění pouze v jedné ose. To sice v aerodynamickém tunelu (kde vzduch proudí právě v této ose) nevadilo, ale ve venkovním prostředí je nepravděpodobné, aby byla takto zachycena právě osa, ve které vzduch proudí. Měřící pracoviště je na obr. 11.5. Protože byla změněna vzdálenost měničů na 1,1 m, bylo opět nutné kalibrovat systém v laboratoři při bezvětří pro předpokládanou hodnotu rychlosti zvuku $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jeden měnič vykazoval opět delší dobu přenosu (tentokrát až o 500 μs oproti původním 40 μs) a doba přenosu byla v porovnání s teoretickými 3235 μs o cca 959 μs větší.

Tyto fakta byly využity při zpracování hodnot z měření ve větrném prostředí na FP. Výsledky měření jsou v tab. 11.2. Jako referenční měření bylo použito opět měření pomocí UZ měničů, tentokrát položených na panel ve vzájemné vzdálenosti 0,5 m (tedy ve vzdálenosti použité při testech v aerodynamickém tunelu).



Obr. 11.5: Měření na venkovní instalaci panelu

Tab. 11.2: Měření na venkovní instalaci panelu

Číslo měření [-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Rychlost proudění [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	39,58	41,33	38,57	29,61	44,9	40,27	40,64	43,67	40,1
Rychlost proudění pro vzdálenost měničů 0,5 m [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	1,74	0,58	2,80	2,81	2,13	1,91	2,25	2,36	2,34

11.4 Zhodnocení měření na venkovní instalaci panelu

Z výsledků měření na venkovní instalaci panelu vyplývá, že přístroj kalibraci opravdu potřebuje. Pro vzdálenost 0,5 m testovanou v předešlých fázích práce se podařilo naměřit reálné hodnoty, nicméně pro vzdálenost 1,1 m nikoliv. Naměřené hodnoty proudění odpovídají podle Beaufortovy stupnice síly větru [32] orkánu, což je podle zmíněné stupnice nejvyšší možný stupeň síly větru s ničivými účinky.

Pro měření na vzdálenost 1,1 metru docházelo k přetečení časovače MCU (časovač při použití hodinového signálu 24 MHz nepřetékal do vzdálenosti cca 0,8 m), proto byla pro toto měření snížena frekvence hodinového signálu časovače na 1,5 MHz. Tím se rapidně snížila přesnost (časovač inkrementuje po 2,8 μs , což je samo o sobě na této vzdálenosti 0,35 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ rozdíl). MCU ovšem umožňuje nastavení frekvence časovačů i na 12 MHz, což je už dostačující řešení (inkrementace po 0,34 μs , rozdíl 0,05 μs).

Je pravděpodobné, že přenastavením hodinového signálu MCU došlo k chybě vedoucí k posunutým výsledkům.

Důležitým poznatkem z tohoto měření je fakt, že pro realizaci vícesosového systému je vhodné použít více časovačů, kdy pro vzdálenosti v oblasti 0,5 m bude použito přesnější nastavení a pro oblasti nad 1 m bude použito nastavení méně přesné, ale s prevencí přetečení časovače.

12 ZÁVĚR

Cílem práce *Ultrazvukový měřicí systém* bylo navrhnout a realizovat inteligentní měřicí modul pro experimentální měření proudění vzduchu v okolí fotovoltaického panelu pomocí ultrazvuku. Dále bylo cílem ověřit funkci tohoto systému v laboratorních podmínkách v aerodynamickém tunelu a také na venkovní instalaci panelu.

Tyto cíle se podařilo kompletně splnit.

Po prostudování dané problematiky byl navržen hardware i software měřicího systému. Před kompletizací systému byly jednotlivé části hardware sestrojeny a testovány pomocí laboratorních zařízení. Nakonec byl realizován kompletní prototyp měřicího systému, který je schopen měřit proudění vzduchu na vzdálenostech odpovídajícím rozměrům fotovoltaických panelů.

S tímto prototypem bylo provedeno měření v aerodynamickém tunelu. Toto měření bylo zároveň provedeno i se zapůjčeným komerčním miskovým anemometrem a také obsahovalo porovnání s charakteristikami udávanými výrobcem tunelu Ing. Jiřím Hofmanem. Výsledkem měření bylo, že systém skutečně je schopen přesně měřit rychlost proudění vzduchu, ale hodnoty byly vyšší než předpokládané skutečné, nicméně vždy ve stejném poměru vzhledem k jiným měřičům.

Dále byly provedeny testy na venkovní instalaci panelu, kde systém sice měřil pro 0,5 m vzdálenost měničů očekávané hodnoty, ale pro vzdálenost 1,1 m již změřil hodnoty příliš vysoké.

Z těchto poznatků plyne, že systém funkční je, ale je nutná jeho kalibrace.

Největším problémem při řešení práce byl požadavek aplikovatelnosti systému na fotovoltaický panel. Tím vznikla nutnost přenášet signál na větší vzdálenosti a také bylo třeba řešit problémy se šumem vznikajícím na kabeláži měničů.

Systém má potenciál pro další práci. Například se nabízí zmíněná kalibrace měřicího systému. Dále je možné se zabývat vylepšením stávajícího konstrukčního řešení a hardware, dobrým nápadem je změna mikrokontroléru, protože pro systém bude stačit mnohem jednodušší mikrokontrolér, než Renesas 78K0R použitý v této práci. Poslední problematikou z oblasti této práce je integrace zařízení do měřicího systému pro sledování efektivity fotovoltaického panelu Ing. Jiřího Hofmana.

LITERATURA

- [1] ČEZ. [online]. 2007 [cit. 2010-5-30]. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice Dostupné na WWW: <http://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/oze-cr-all-17-01-obalka-in.pdf>
- [2] EkoWATT. [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. Účinnost panelů Dostupné na WWW: <http://fotovoltaika.ekowatt.cz/ucinnost-panelu.php>
- [3] Sollaris. [online]. 2013 [cit. 2010-5-30]. Solární panely Dostupné na WWW: <http://www.sollaris.cz/slunecni-elektrarny/solarni-panely>
- [4] Křepelka, Pavel. *Ultrazvukový anemometr*. Diplomová práce FEKT – VUT v Brně, 2011, 68s. Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [5] Pouč, P.: *Měření rychlosti šíření ultrazvuku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2009. Počet stran 89. Počet stran příloh 15. Diplomová práce. Vedoucím práce byl Ing. Radovan Jiřík, Ph.D.
- [6] HOFMAN, J. *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [7] VRÁNA, M. *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [8] HOFMAN, J. *Monitorovací systém vlivu proudění vzduchu na funkci fotovoltaického panelu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [9] Farnell [online]. 2010 [cit. 2013-5-30]. Katalogový list UZ měničů 400EP18A. Dostupné na WWW: <http://www.farnell.com/datasheets/524508.pdf>
- [10] CleanEnergy [online]. 2012 [cit. 2013-5-30]. Agua Caliente Solar Project. Dostupné na WWW: http://www.cleanenergyactionproject.com/CleanEnergyActionProject/CS.Agua_Caliente_Solar_Project___Thin_Film_Photovoltaic_Solar_Power_Case_Studies.html
>
- [11] JE Temelín a Dukovany [online]. 2012 [cit. 2013-5-30]. Jaderné elektrárny Temelín a Dukovany. Dostupné na WWW: <http://www.je-temelin-dukovany.cz>
- [12] Powermag [online]. 2012 [cit. 2013-5-30]. TOP PLANT: Three Gorges Dam, Yangtze River, Hubei Province, China. Dostupné na WWW: http://www.powermag.com/renewables/hydro/TOP-PLANT-Three-Gorges-Dam-Yangtze-River-Hubei-Province-China_5184_p2.html

- [13] *Energetický regulační úřad* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. Sluneční elektrárny, stav k 1.1.2013. Dostupné na WWW: http://www.eru.cz/user_data/files/licence/info_o_drzitelich/OZE/SLE.pdf
- [14] *AUDON Electronics* [online]. 2013 [cit. 2013-5-31]. Katalogový list miskového anemometru TX20ETH. Dostupné na WWW: [<http://www.audon.co.uk/user/downloads/tx20ethb.pdf](http://www.audon.co.uk/user/downloads/tx20ethb.pdf)
- [15] *D-Ex Instruments* [online]. 2011 [cit. 2013-5-31]. Katalogový list ultrazvukového anemometru Vaisala WMT700. Dostupné na WWW: http://www.dex.cz/dokumenty/wmt700_cz_scr.pdf
- [16] *F1News* [online]. 2012 [cit. 2013-5-31]. Pitotovy trubice- jak pomáhají v mapování aerodynamiky vozů F1? Dostupné na WWW: <http://f1news.autoroad.cz/technika/42191-pitotovy-trubice-jak-pomahaji-v-mapovani-aerodynamiky-vozu-f1>
- [17] *Kipp & Zonnen* [online]. 2013 [cit. 2013-5-31]. Pyranometr CPM 21. Dostupné na WWW: <http://www.kippzonen.com/?product/1491/CMP+21.aspx>
- [18] *GM Electronic* [online]. 2013 [cit. 2013-5-31]. katalogový list teplotního čidla DS18B20. Dostupné na WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/530/530-067/dsh.530-067.1.pdf>
- [19] *Texas Instruments* [online]. 2005 [cit. 2013-5-30]. Katalogový list operačního zesilovače TL071. Dostupné na WWW: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl071a.pdf>
- [20] *Texas Instruments* [online]. 2008 [cit. 2013-5-30]. Katalogový list operačního zesilovače OPA454. Dostupné na WWW: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa454.pdf>
- [21] BIOLEK, D.; HÁJEK, K.; KRTIČKA, A. *Analogové elektronické obvody - přednášky*. Analogové elektronické obvody - přednášky. [Skriptum]. Brno: FEKT VUT Brno, 2007. s. 1-264. ISBN: MEL 07-030.
- [22] *Texas Instruments* [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. PSpice model OPA454. Dostupné na WWW: <http://www.ti.com/product/opa454>
- [23] *Texas Instruments* [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. PSpice model TL071. Dostupné na WWW: <http://www.ti.com/product/tl071>
- [24] KAZELLE, J., HAVLÍČEK, S., JIRÁK, J., LIEDERMANN, K., ROZSÍVALOVÁ, Z., SEDLAŘÍKOVÁ, M., VANĚK, J. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy, elektronické texty*. Brno: 2003. s. 1-272. ISBN: ETE 101.
- [25] *Agilent Technologies* [online]. 2008 [cit. 2010-5-30]. Katalogový list osciloskopu Agilent DSO3102A. Dostupné na WWW: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-2235EN.pdf>

- [26] *Renesas* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. Minicube 2. Dostupné na WWW: http://www.renesas.com/products/tools/emulation_debugging/onchip_debuggers/minicube2/index.jsp
- [27] *Renesas* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. 78K0R/Fx3. Dostupné na WWW: http://documentation.renesas.com/doc/products/mpumcu/doc/78k/r01uh0007ej0600_78k0rfx3.pdf
- [28] *Renesas* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. Demoboard QB-78K0RFG3-TB. Dostupné na WWW: http://am.renesas.com/products/tools/introductory_evaluation_tools/cpu_board/qb_78k0rfg3_tb/index.jsp
- [29] *IAR* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. IAR Embedded Workbench for Renesas 78K. Dostupné z WWW: <http://www.iar.com/en/Products/IAR-Embedded-Workbench/Renesas-78K>
- [30] *Applilet* [online]. 2013 [cit. 2013-5-30]. Applilet. Dostupné z WWW: http://www.renesas.eu/products/tools/coding_tools/coding_assistance/applilet/index.jsp
- [31] *Českomoravští amatéři vysílači* [online]. 2008 [cit. 2011-12-14]. Katalogový list generátoru TESLA BM492. Dostupné na WWW: http://www.c-a-v.com/e107_files/downloads/BM492%20Generator%2010Hz-10Mhz.pdf
- [32] *Met Office* [online]. 2010 [cit. 2013-5-30]. National meteorological library and archive fact sheet 6 – The Beaufort Scale. Dostupné na WWW: http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/4/4/Fact_Sheet_No._6_-_Beaufort_Scale.pdf

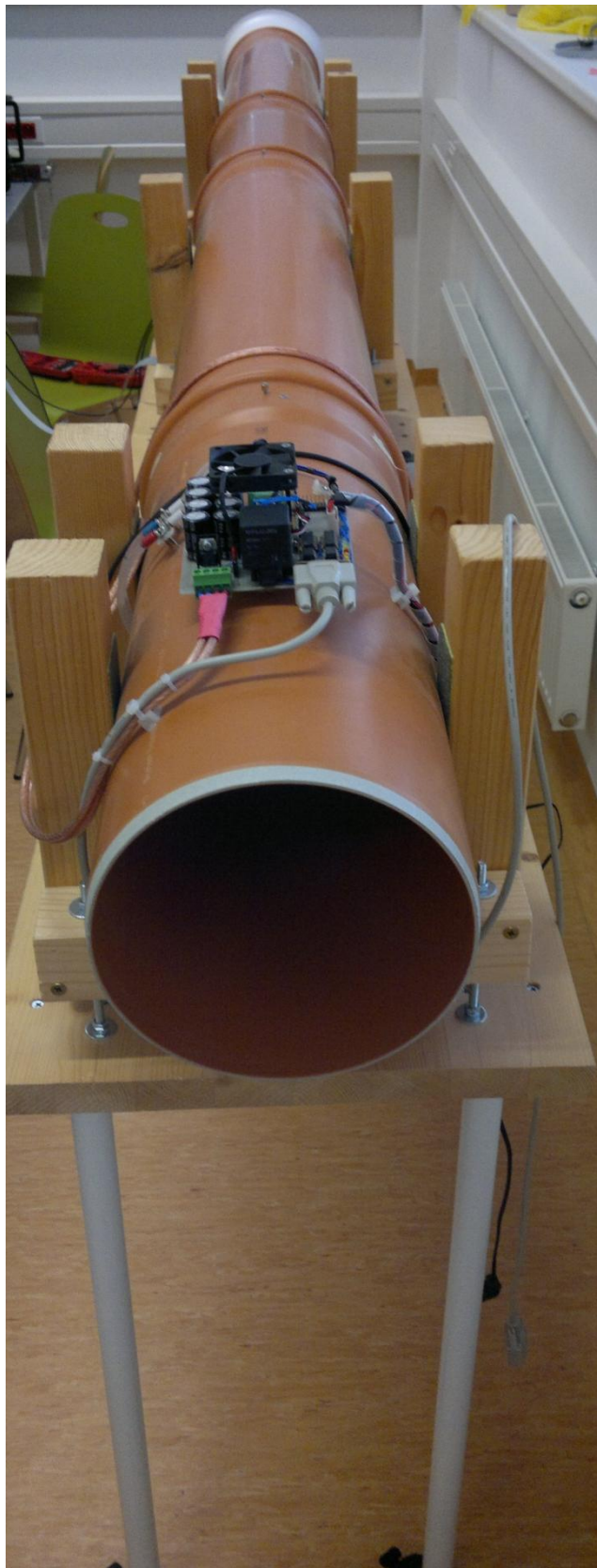
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

UZ	Ultrazvuk
OZ	Operační zesilovač
MCU	Mikrokontrolér
FP	Fotovoltaický panel
DP	Diplomová práce
FV	Fotovoltaika
PC	Personal computer
UMS	Univerzální měřicí systém

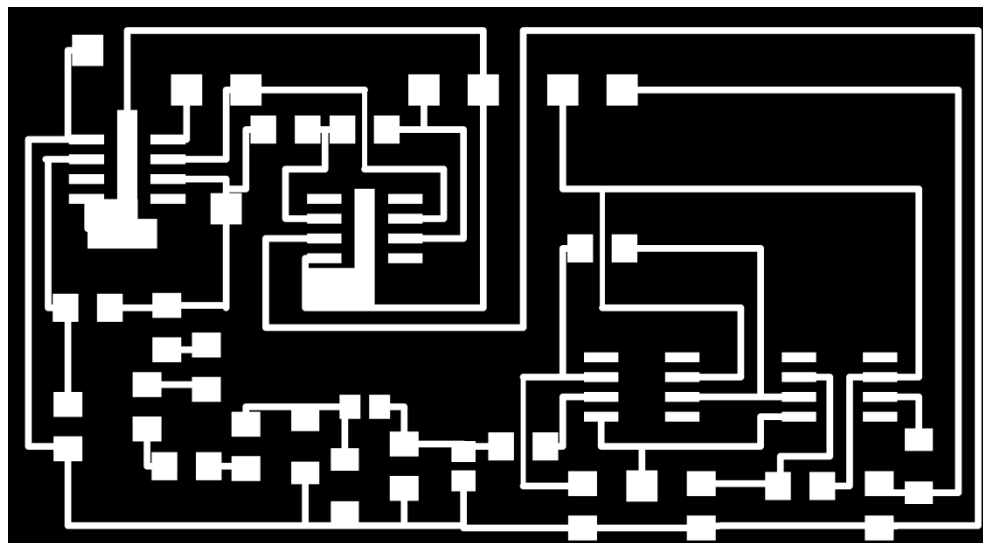
SEZNAM PŘÍLOH

A	Aerodynamický tunel.....	52
B	Deska plošného spoje.....	53
C	Seznam součátek pro jednoosý systém.....	54
D	Zdrojový kód programu MCU	55
	D.1 Main	55
	D.2 Obsluha přerušení	56

A AERODYNAMICKÝ TUNEL



B DESKA PLOŠNÉHO SPOJE



Rozměr desky 65 x 35 [mm], měřítko M2:1

C SEZNAM SOUČÁTEK PRO JEDNOOSÝ SYSTÉM

Součástka	Hodnota	Počet
Keramický kondenzátor	1n	2
Keramický kondenzátor	2n	1
Trimr	10k	1
Trimr	47 μ	1
Operační zesilovač DIP8	TL071	5
Operační zesilovač SOIC8	OPA454	5
Metalizovaný rezistor	1k	3
Metalizovaný rezistor	3k	2
DC-DC měnič	FDD03-05D	1
Elektrolytický kondenzátor	10 μ	1
Elektrolytický kondenzátor	4,7 μ	1
SMD rezistor 1206	1k	8
SMD rezistor 1206	10k	6
SMD rezistor 1206	62k	2
SMD rezistor 1206	300	2
SMD rezistor 1206	220	10
SMD rezistor 1206	51k	2
SMD rezistor 1206	20k	2
SMD kondenzátor 0805	100n	2
SMD kondenzátor 0805	100p	2

D ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU MCU

D.1 Main

```
#include "CG_macrodriver.h"
#include "CG_system.h"
#include "CG_port.h"
#include "CG_int.h"
#include "CG_timer.h"
#include "CG_userdefine.h"

void main(void)
{
    PU12_bit.no0 = 1;           //aktivace pull up pro přerušení z tlačítka
    INTP0_Enable();            //povolení přerušení tlačítka
    while (1U)                  //nekonečná smyčka
    {
    }
}
```


D.2 Obsluha přerušení

```
#include "CG_macrodriver.h"
#include "CG_int.h"
#include "CG_timer.h"
#include "CG_userdefine.h"

int a[40],b[40]; int c[40]; int d[40];
long i=0;
int j=0;

void sort(int n, int x[]) {                                     //Funkce pro seřazení pole
    int temp;
    int k, l;
    for(k=0; k<n-1; k++) {
        for(l=k+1; l<n; l++) {
            if(x[l] < x[k]) {
                temp = x[k];
                x[k] = x[l];
                x[l] = temp;
            }
        }
    }
}

#pragma vector = INTP0_vect
__interrupt void MD_INTP0(void)                                //Rutina pro přerušení z tlačítka
{
    P15_bit.no6=!P15_bit.no6;                                   //Změna stavu testovací LED diody
    P15_bit.no7=0;       //Zapnutí druhé LED diody—indikace probíhajícího měření
    P15_bit.no0=1;       //Zapnutí OPA454 na bloku budiče
    P4_bit.no6 = 1;      //Napájení sinus generátoru
    P4_bit.no5 = 1;      //Zapnutí OPA454 zesilovače č.1
    INTP2_Enable();      //Povolení přerušení přijímače č.2
    TAU0_Channel0_Start(); //Start časovače
}
```

```

#pragma vector = INTP2_vect                                //Obsluha přerušení z přijímače č.2
__interrupt void MD_INTP2(void)
{
    TAU0_Channel0_Stop();                                  //Stop časovače
    INTP2_Disable();                                       //Zakáz přerušení z přijímače č. 2
    P15_bit.no0=0;                                         //Vypnutí OPA454 na bloku budiče
    P4_bit.no6=0;                                           //Stop napájení generátoru
    P4_bit.no5 = 0;                                         //Stop zesilovač č.1

    a[j]=TCR00;                                             //Přiřazení hodnoty časovače do proměnné a
    a[j]=a[j]/12;                                           //Přepočet proměnné a na µs

    for (i=0;i<32000;i++)                                  //Zpoždění cca 150 ms
    {
        P15_bit.no0=1;                                     // Zapnutí OPA454 na bloku budiče
        P4_bit.no6=1;                                       //Napájení sinus generátoru
        P15_bit.no3 = 1;                                    //Zapnutí OPA454 zesilovače č.2
        P15_bit.no6=!P15_bit.no6;                          //Změna stavu testovací LED diody
        TAU0_Channel0_Start();                             //Start časovače
        INTP5_Enable();                                    //Povolení přerušení přijímače č.1
    }
}

```

```

#pragma vector = INTP5_vect                                //Obsluha přerušení z přijímače č.2
__interrupt void MD_INTP5(void)
{
    int k=0;
    TAU0_Channel0_Stop();                                //Stop časovače
    INTP5_Disable();                                    //Zakáz přerušení z přijímače č. 1
    P4_bit.no6=0;                                        //Stop napájení generátoru
    P15_bit.no0=0;                                       //Vypnutí OPA454 na bloku budiče
    P15_bit.no3 = 0;                                     //Stop zesilovač č.2
    b[j]=TCR00/12;                                       //Přiřazení hodnoty časovače do proměnné a
    j++;                                                //Inkrementace proměnné j
    for (i=0;i<5000;i++)                                //Zpoždění cca 150 ms
    {
        P15_bit.no0=1;                                  // Zapnutí OPA454 na bloku budiče
        P4_bit.no6=1;                                    //Napájení sinus generátoru
        P4_bit.no5 = 1;                                  //Zapnutí OPA454 zesilovače č.1
        P15_bit.no6=!P15_bit.no6;                       //Změna stavu testovací LED diody
        TAU0_Channel0_Start();                           //Start časovače
        INTP2_Enable();                                  //Povolení přerušení přijímače č.2
        if (j==40) {                                     //Pokud bylo naměřeno 40 hodnot
            INTP2_Disable();                             //Zakáz přerušení z přijímače č. 2
            INTP5_Disable();                             //Zakáz přerušení z přijímače č. 1
            P4_bit.no6=0;                                 //Stop napájení generátoru
            P15_bit.no0=0;                                //Vypnutí OPA454 na bloku budiče
            P4_bit.no5 = 0;                               //Stop zesilovač č.1
            P15_bit.no3=0;                                //Stop zesilovač č.2
            j=0;                                          //Vynulování j
            P15_bit.no7=0;                                //Vypnutí druhé LED diody- konec měření
            TAU0_Channel0_Stop();                        //Stop časovače
            for (k=0;k<40;k++) {                          //Výpočet rozdílů naměřených hodnot
                c[k]=a[k]-b[k];
                d[k]=c[k];    }
            sort (40,d);    } }                          //Seřazení rozdílů naměřených hodnot

```